

KYÖSTI LAUKKANEN  
PEKKA HALONEN  
ERKKO PYY

# Sitomattomien materiaalien jatkuvatoiminen tiivistystarkkailu

TIIVI-PROJEKTI, LOPPURAPORTTI





Kyösti Laukkanen, Pekka Halonen, Erkko Pyy

# Sitomattomien materiaalien jatkuvatoiminen tiivistystarkkailu

Tiivi-projekti, Loppuraportti

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2012

Liikennevirasto

Helsinki 2012

*Kannen kuva: Kyösti Laukkanen*

Verkkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6665

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-029-3

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373



**Kyösti Laukkanen, Pekka Halonen, Erkki Pyy: Sitomattomien materiaalien jatkuvatoiminen tiivistystarkkailu (Tiivi-projekti).** Liikennevirasto, väylätekniikkaosasto. Helsinki 2012. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2012. 78 sivua ja 10 liitettä. ISSN-L 1798-6665, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-029-3.

**Asiasanat:** tiivistäminen, jyrä, sitomaton kerros, jatkuvatoiminen tiivistystarkkailu, rakennustyömaa, työkonemaatila, laadunvalvonta, sähköinen laatuasiakirja

## Tiivistelmä

Tutkimus täryjyrän jatkuvatoimisen tiivistystarkkailun käytöstä sitomattomien maakerrosten tiivistystyön ohjaamiseen ja valvontaan toteutettiin vuosina 2008–2010. Tutkittu työmenetelmä perustui jyrin asennettuihin tiivistymistä mittaaviin laitteisiin ja jyrän GPS-paikannukseen. Projektin tulokset on julkaistu Liikenneviraston internet-sivulla osoitteessa: [www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi).

Projektin keskeisiä tuloksia olivat:

- Jatkuvatoimisella tiivistyksentarkkailulaitteella ja GPS-paikannuksella varustetulle jyrälle suositeltu menetelmä tiivistystyön vaatimustenmukaisuuden osoittamiseen on jatkaa tiivistämistä, kunnes jyrän tiivistysmittauksen tulokset eivät enää parane, dokumentoida tiivistystyön toteutus ja mittaustulokset sähköiseen muotoon koko tiivistyskohdealueelta ja tehdä tiiviysaste- tai tiiviyssuhdemittaukset kantavuudeltaan heikoimmissa kohdissa.
- Jatkuvatoimista, dokumentoivaa tiivistyksentarkkailua käytettäessä voidaan vähentää piste-kohtaisten laatumittausten määrää ja saada tiivistystyön sähköinen laatudokumentti koko työmaan alueelta.
- Projektissa laadittiin ohje jyrän jatkuvatoimisen tiivistyksentarkkailulaitteen käytöstä ja työmaalibroinnista (jyrän mittaustulosten muuntaminen kantavuusarvoiksi). Sen mukaan levykuormituskoje ja raskas pudotuspainolaite soveltuivat jatkuvatoimisen tiivistyksentarkkailulaitteen kalibroinnin vertailulaitteiksi. Jyrän mittaustulos korreloi näiden vertailulaitteiden kantavuusarvojen kanssa, mutta ei InfraRYL:n laatuvaatimuksena olevan tiiviyssuhteen kanssa tai tiiviysasteen kanssa.
- Kalibrointimittaukset tulisi tehdä mahdollisimman pian kalibrointialueen tiivistystyön päättymisen jälkeen. Jos raskas työmaaliikenne on ehtinyt saada aikaan syvät ajourat tiivistetyn kerroksen pintaan, kalibrointi ei onnistu luotettavasti. Kalibrointi onnistuu vain, jos tiivistyskohde täyttää työmaalibrointiohjeen vaatimukset. Tällöin jyrän mittaustulos voidaan muuntaa kantavuuden mittayksiköiden mukaiseen muotoon.
- Jatkuvatoimisen tiivistyksentarkkailun laajamittainen käyttöönotto edellyttää uutta tietoa ja osaamista urakoitsijoille, rakennuttajille ja jyrin maahantuojoille. Osaamisen kehittämiseen voidaan käyttää Tiivi-projektin aikana laadittuja asiakirjoja.

Tutkimusraportin lisäksi projektin tuloksina laadittiin seuraavat asiakirjat samaan aikaan kuin tutkimusprojekti valmistui:

- InfraRYL asiakirjan muutosehdotukset sitomattomien kerrosten tiivistämistä koskeviin kohtiin,
- Jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen käyttö- ja työmaalibrointiohje sitomattomien maakerrosten tiivistystyössä,
- Standardiehdotus sitomattomien kiviainesseosten maksimikuivairtotiheyden ja optimivesipitoisuuden määrittämisestä kiertotiivistimellä.

**Kyösti Laukkanen, Pekka Halonen, Erko Pyy: Yttäckande packningskontroll för obundna lagren. Slutrapport för projektet Tiivi.** Trafikverket, infrastrukturteknik. Helsingfors 2012. Trafikverkets undersökningar och utredningar 25/2012. 78 sidor och 10 bilagor. ISSN-L 1798-6665, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-029-3.

**Nyckelord:** packning, vält, obundet lager, yttäckande packningskontroll, byggnadsplats, automation av byggnadsmaskiner, kvalitetskontroll, elektriskt kvalitetsdokument

## Sammanfattning

Forskningen betraktar vältar, som är utrustade med yttäckande packningskontrollmätare och kontinuerligt dokumenterande GPS-lokalisering, och utfördes under åren 2008–2010. Denna rapport innehåller dess mest betydande resultat. Resultat av projektet har publicerats på Trafikverkets Internetsida.

Projektets mest betydande resultat var:

- Den rekommenderade metoden för acceptans-kontroll av packningsarbeten genom att använda en vält, som är utrustad med yttäckande packningskontrollmätare och kontinuerligt dokumenterande GPS-lokalisering, är följande: packa hela kontrollobjektet till maximal densitet, dokumentera mättningsresultaten i elektroniskt format över hela ytan och mät om packningsresultatet uppfyller kraven (packningsgrad eller packningskvot) för byggnadsspecifikationer på de delytor, som har de lägsta bärigheterna,
- Med yttäckande packningskontroll får man information om packningsarbetets homogenitet över hela byggnadsplatsen,
- Projektet frambringade en instruktion för kalibrering av vältens yttäckande packningskontrollmätare på byggplats. Statisk plattbelastningsmetod och tung fallviktsdeflektometer fungerade bra som kalibreringsmetoder för vältmätaren. Vältmätarvärden korrelerade med bärighetsvärden för dessa referensmetoder, men de korrelerade inte med packningsgrad eller packningskvot, som är krav för byggnadsspecifikationer.
- Kalibreringsmätningar borde utföras så snart som möjligt efter packningen av kalibreringsplatsen. Om tung trafik på byggnadsplatsen har förorsakat djupa spår i ytan av det packade lagret, kan kalibreringen inte utföras pålitligt. Då kan man inte konvertera vältmätarvärden till samma måttenheter som bärighetsresultat med referensmetoder.
- Omfattande ibruktage av yttäckande packningskontroll fordrar ny information och nytt kunnande för entreprenörer, byggherrar och importörer av vältar. Dokumenten som producerats under projektet kan utnyttjas vid utveckling av kunnandet.

Förutom forskningsrapporten sammanställdes följande dokument när forskningsprojektet blev färdigt:

- Ändringsförslag till byggnadsspecifikationens (InfraRYL) paragrafer gällande packning av obundna lager,
- Manual för utförande och kalibrering av yttäckande packningskontroll på byggplats vid packning av obundna jordmaterial,
- Utkast till en standardmetod för fastställning av den maximala torra densiteten och den optimala fuktigheten av obundna krossade stenmaterial genom att använda en gyratorisk packningsmetod.

**Kyösti Laukkanen, Pekka Halonen, Erko Pyy: Continuous compaction control for unbound materials. Tiivi-project, Final report.** Finnish Transport Agency, Infrastructure Technology. Helsinki 2012. Research reports of the Finnish Transport Agency 25/2012, 78 pages and 10 appendices. ISSN-L 1798-6665, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-029-3.

**Key words:** compaction, roller, unbound material, continuous compaction control, construction site, working machine automation, quality control, electric quality document

## Summary

The study about compaction of unbound soil layers using a roller equipped for continuous compaction control was carried out in 2008-2010. The results of the project have been published on the internet site of the Finnish Transport Agency: [www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi).

The essential results of the project were:

- The recommended method for conformity assessment of compacting using the continuous compaction control linked to the GPS-positioning of the roller as follows: compact the area on every point to the maximum density, document the measuring result in an electrical format for the whole site and measure according to construction specifications the ratio of the layer site density to the laboratory maximum density (density ratio) or relation between the second and first bearing values (density relation) on the weakest points of the bearing capacity.
- The continuous compaction control provides knowledge about the homogeneity of compaction of the whole site.
- The project provided a specification for usage of a roller with continuous compaction control and its site calibration. A plate loading device and the falling weight deflectometer were the most suitable methods for the reference methods in calibration. The measuring results of the roller correlated with the results of these reference devices, but they did not correlate with the requirements of InfraRYL (density ratio and density relation).
- The calibration should be made as soon as possible after the compaction. If heavy site traffic has made ruts to the surface of the compacted layer, a reliable calibration could not be made. The calibration can be made only when the calibration compacting area meets the requirements of the specifications for calibration. Then measuring results of the roller can be changed to the format of requirements.
- The contractors, orderers and roller importers need new knowledge and education before the continuous compaction control method may come to common use. Education include using results of this project.

The change proposals of essential results were made for the construction specifications at the same time as the research project was completed.

Besides the research report, the project results included the following documents:

- proposals of change to the Finnish construction specifications,
- usage of the continuous compacting control device and its site calibration for compacting of unbound soil layers,
- a standard method draft for testing the maximum density and the optimum moisture of unbound aggregate mixes by a gyratory compactor.

## Esipuhe

Tutkimus on rakennusalan yhteisrahoituksella toteutettu projekti "Väylien ja kenttien tiivistystyön laatutason parantaminen uuden rakentamisteknologian avulla" (Tiivi-projekti). Tutkimuksen rahoittivat Liikennevirasto (Tiehallinto ja Ratahallintokeskus), Helsingin ja Espoon kaupungit, Skanska Infra Oy, Destia Oy, NCC Roads Oy, Andament Oy, Wirtgen Finland Oy, Wihuri Oy Witraktor, KH-Koneet Oy, Volvo Construction Equipment Oy ja VTT. Projektin ohjausryhmään kuuluivat:

Tuomo Kallionpää, pj.	Liikennevirasto
Pekka Merinen	Liikennevirasto
Petri Cavander	Espoon kaupunki
Ilpo Korhonen	Espoon kaupunki
Juha Hännikäinen	Espoon kaupunki
Markku Miettinen	Helsingin kaupungin rakennusvirasto
Antti Korhonen	Skanska Infra Oy
Raimo Ledentsä	Destia Oy
Mika Jaakkola	Destia Oy
Manu Marttinen	NCC Roads Oy
Antti Nissinen	Andament Oy
Ari Tulus	Wirtgen Finland Oy
Max Björkskog	Wihuri Oy Witraktor
Kari Kuusisto	KH-Koneet Oy
Jouni Pääki	Volvo Construction Equipment Finland Oy
Kyösti Laukkanen, siht.	VTT

Projektin ohjausryhmä asetti työn kenttäkokeita valmistelemaan ja ohjaamaan pien-ryhmän, johon kuuluivat kunkin koekohteen rakennuttajan ja urakoitsijan edustajat, kohteessa kokeiltavien jyrrien maahantuojiin edustajat sekä ohjausryhmän jäseniä har-kintansa mukaan.

Tutkimusraportin ovat laatineet dipl.ins. Kyösti Laukkanen, tutk.ins. Pekka Halonen ja fil.yo. Erko Pyy VTT:sta.

Helsingissä elokuussa 2012

Liikennevirasto  
Väylätekniikkaosasto, rakenneyksikkö

# Sisällysluettelo

1	JOHDANTO.....	9
1.1	Tutkimuksen tausta .....	9
1.2	Käsitteitä .....	9
1.3	Lyhenteitä.....	10
1.4	Projektin tavoite .....	10
2	MENETELMÄT JA AINEISTO.....	11
2.1	Nykytilaselvitys .....	11
2.1.1	Yleistä .....	11
2.1.2	Jyränvalmistajien kalibrointiohjeet .....	11
2.1.3	Kiertotiivistyskoemenetelmän kehitys.....	13
2.1.4	Tutkimuksia ja ohjeita kiertotiivistimen käytöstä.....	14
2.2	Jyräystutkimukset työmaalla .....	16
2.2.1	Tutkimuskohteet .....	16
2.2.2	Jyrät .....	19
2.2.3	Jyrän mittaustulosten kalibrointi työmaalla .....	21
2.3	Laatumittaukset .....	21
2.3.1	Laboratoriokokeet.....	21
2.3.2	Urakkaan kuuluvat laatumittaukset.....	22
2.3.3	Tiivi-projektiin kuuluvat laatumittaukset.....	22
3	TULOKSET.....	23
3.1	Nykytilaselvitys .....	23
3.1.1	Tiivistystöiden laatuvaatimukset.....	23
3.1.2	Dynaaminen tiivistyksen tarkkailumenetelmä .....	25
3.2	Jyräystutkimukset vuonna 2008 Nummelassa .....	29
3.2.1	Yleistä .....	29
3.2.2	Jyrien ja jyrän mittauslaitteiden käytön opastus .....	29
3.2.3	Tiivistyksen tarkkailulaitteen kalibrointi työmaalla .....	30
3.2.4	Kalibrointimittaukset .....	31
3.3	Jyräystutkimukset 2009 Suurpellon kohteissa .....	40
3.3.1	Yleistä .....	40
3.3.2	Koealueet .....	40
3.3.3	Paikkatiedot työmaan koordinaatistoon.....	43
3.3.4	Suunnitelmakartta mittaustulosten taustaksi.....	44
3.3.5	Mittausten sijainnin sitominen referenssilinjaan.....	45
3.3.6	Jyrien mittaustiedon paikantamisen tarkkuus .....	45
3.3.7	Kalibrointimittaustuloksia.....	48
3.3.8	Tiiviysaste ja -suhde kalibroinnin vertailuarvoina.....	60
3.4	Proctor- ja kiertotiivistyskokeet .....	65
4	JOHTOPÄÄTÖKSIÄ.....	73
5	TIIVI-PROJEKTIN JULKAISUT .....	76
	KIRJALLISUUSVIITTEET .....	77

## LIITTEET

Liite 1	Sitomattomien materiaalien jatkuvatoiminen tiivistystarkkailu ja jyrän tiivistyksen tarkkailulaitteen kenttäkalibrointi (Ohje 10 s.)
Liite 2	Tiivistyksen tarkkailulaitteen kalibrointilomake (Esimerkki)
Liite 3	Koejyrsäys ilman jyrän tiivistyksen tarkkailulaitetta (Ohje 2 s.)
Liite 4	Kalibrointituloksia
Liite 5	Jyrien ja niiden varusteiden teknisiä tietoja
Liite 6	Koealueiden rakeisuustietoja
Liite 7	Kantavuusmittaustuloksia - Levykuormituskoe
Liite 8	Kantavuusmittaustuloksia - Raskas Loadman
Liite 9	Kantavuusmittaustuloksia - Kevyt Loadman
Liite 10	Tiheys- ja kosteusmittaustuloksia - Troxler

# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Tie- tai kenttärakenteen kerrosten tiiviys vaikuttaa suoraan rakenteen moniin keskeisiin toiminnallisiin ominaisuuksiin. Kaikilla kerrosrakenteilla pätee yleensä sääntö: mitä parempi on rakenteen tiiviys, sitä kantavampi ja kestävämpi se on. Tiivistyspuutteen seurauksena löyhäksi jäänyt rakenne vaurioituu kuormitusten vaikutuksesta nopeammin kuin hyvin tiivistetty rakenne. Tiiviyden merkitys on korostunut useissa aiemmissakin tutkimuksissa: esim. STABIL-projektin eräs keskeinen tutkimustulos oli, että stabiloidun rakennekerroksen tiiviyden kasvu parantaa merkittävästi sen toiminnallisia ominaisuuksia ja TPPT-tutkimuksissa todettiin hyvän tiiviyden pienentävän tierakenteen muodonmuutoksia ja siten kasvattavan sen käyttöikää.

Tie- ja kenttärakenteet tehdään usein heikosti kantavan, epätasaisesti painuvan ja routivan pohjamaan päälle. Siksi rakennekerrosten tulee olla joustavia ja sitkeitä kestääkseen vaurioitumatta alustan liikkeitä. Pohjamaan vaihteluista johtuen rakenteen eri kohdat edellyttävät erilaisia tiivistystyömääriä. Liian vähän tiivistetty tien kohta jää löyhäksi ja toisaalta liiallinen tiivistys rikkoo rakennetta ja pohjamaata. Tiivistyspuutteet heikentävät rakennetta, lisäävät kunnossapitokustannuksia ja johtavat rakenteen käyttöiän lyhenemiseen sekä elinkaartilouden heikkenemiseen.

Tiiviiden rakenteiden tekeminen on edullinen tapa parantaa rakennetta kestävä kehityksen periaattein, koska laatu paranee lisäämättä materiaalikustannuksia ja jopa materiaalikustannuksia säästään.

Nykyaikaisiin täryjyriin on saatavissa tiivistyksen tarkkailu- ja paikannuslaitteet, joiden avulla jyrän kuljettaja voi seurata rakenteen tiivistymistä jatkuvatoimisesti koko tiivistystyömaan alueella. Näiden laitteiden mahdollisuuksia tiivistämisen laadun ohjaamiseen tai varmistamiseen ei kuitenkaan hyödynnetä käytännössä lainkaan eikä mittaustuloksia dokumentoida. Laitteiden kohdekohtainen kalibrointi on puutteellista ja siksi laitteista ei saada täysimääräistä hyötyä. Käytännössä puuttuu toiminnanohjausjärjestelmä, joka ohjaisi uusien, nykytekniikan mahdollistamien menetelmien käyttöön.

## 1.2 Käsitteitä

Jatkuva tiivistyksen tarkkailu tarkoittaa tiivistysmenetelmää, jossa jyrän täryvalssiin on kiinnitetty kiihtyvyyssanturi, jolla mitataan valssin liikettä jatkuvatoimisesti.

Älykäs tiivistäminen sisältää jyrän tiivistysparametrien ja sijainnin jatkuvatoimisen mittaamisen ja yhdistämisen toisiinsa tiivistyksen aikana.

Kaksoishyppy (Double jump) on epävakaa värähdys, jonka jyrän valssi suorittaa, kun sen kiihtyvyys on liian suuri tiivistettävälle kerrokselle. Valssi värähtää täyden syklin ilmassa. Kaksoishyppy on haitallinen jyräyksen kannalta, koska se heikentää tiivistysvaikutusta, löyhdyttää tiivistynyttä kerrosta ja lyhentää jyrän käyttöikää.

## 1.3 Lyhenteitä

CCC	Continous compaction control (Jatkuva tiivistyksen tarkkailu)
IC	Intelligent compaction (Älykäs tiivistäminen)
CMV	Compaction meter value (Dynapac)
CCV	Caterpillar Compaction value
ACE	Amman Compaction Expert
BVC	Bomag Variocontrol
HMV	Hamm meter value
FWD	Pudotuspainolaite (PPL)
PLT	Levykuormituskoe (LK)

## 1.4 Projektin tavoite

Tutkimuksen tavoitteena oli parantaa sitomattomien ja stabiloitujen kerrosten tiivistystyön laadunvalvonta- ja ohjausmenetelmiä siten, että niitä käyttäen rakennettujen liikenneväylien ja kenttien pinnan tasaisuus sekä pituus- että poikkisuunnassa on parempi, korjaustarve vähäisempi ja käyttöikä pitempi kuin perinteisin menetelmin tehdyn rakenteen.



## 2 Menetelmät ja aineisto

Tutkimus koostui nykytilaselvityksestä, työmailla tehdyistä tiivistyskokeista ja laboratoriokokeista.

### 2.1 Nykytilaselvitys

#### 2.1.1 Yleistä

Nykytilaselvityksessä on kuvattu jyräkohtaisten, jatkuvatoimisten tiivistyksen-tarkkailulaitteiden mittausten menetelmien toimintaperiaatteet, niitä koskeva ohjeistus sekä aiempien tutkimusten tuloksia.

Jatkuvatoimisesta tiivistyksen tarkkailusta valmistui vuonna 2010 pääosin kirjallisuusselvityksenä toteutettu Aalto yliopiston diplomityö, jossa on kuvattu perusteellisesti jatkuvatoimisen tiivistyksen tarkkailun teoriaa, muissa tutkimuksissa tehtyä kehitystyötä ja sovelluksia. Siihen liittyi kenttämittauksia yhdellä Tiivi-projektin koe-alueella Espoon Suurpellon työmaalla, jossa tehtiin myös Tiivi-tutkimuksen tiivistyskokeita, [11].

#### 2.1.2 Jyränvalmistajien kalibrointiohjeet

##### 2.1.2.1 Yleistä

Sitomattomien materiaalien tiivistyksessä käytettävän jatkuvatoimisella tiivistyksen-tarkkailulaitteella ja GPS-paikannuksella varustetun täryjyrän kalibrointiohjeen laatiminen oli eräs Tiivi-projektin tavoite.

Jyrien tiivistyksen tarkkailulaitteet ilmoittavat rakenteen tiivistymisen suhteellisen arvona, johon vaikuttavat mm. pohjamaan ja rakennekerrosten kantavuus, tiivistettävän kerroksen rakeisuuskäyrä, kerrospaksuus, kosteus, jyrän massa, valssin massa ja dynaaminen viivakuorma sekä jyräysparametrit (jyrän ajonopeus, valssin frekvenssi ja amplitudi).

Jotta jyrän mittaustulosta voitaisiin verrata suoraan tiivistystyön laatua (kantavuutta tai tiheyttä) mittaavien perinteisten mittausten menetelmien tuloksiin, jyrän suhteellinen mittaustulos tulisi muuntaa kantavuuden tai tiheyden mittayksiköiksi työkohteessa tehtävän kalibroinnin avulla.

Vaihtoehtoinen tapa jyrämittarin tulosten hyödyntämiseen on jatkaa tiivistämistä, kunnes rakenne ei enää tiivisty jyrän mittalaitteen mukaan, valita jyrämittarin tulosten perusteella heikoimmat kohdat ja varmistaa niissä pistekohtaisilla laadunmittausmenetelmillä, että huonot jyrämittarin tulokset eivät johdu riittämättömästä tiivistyksestä. Tällöin ei tarvitse välttämättä tehdä edellä mainittua jyrämittarin tulosten työmaakalibrointia. Jos työmaakalibrointi tehdään, saadaan sen avulla kuitenkin tässäkin tapauksessa enemmän tietoa kantavuuden tasalaatuisuudesta koko työmaan alueella. Jos huonot jyrämittarin tulokset eivät johdu riittämättömästä tiivistyksestä, voidaan selvittää muut syyt ja mahdollisesti tarvittavat korjaustoimenpiteet.

Kantavuus- ja tiiviyssuhde-mittauksiin käytettäviä pistekohtaisia mittaustaitteita ovat esim. levykuormituslaite ja pudotuspainolaite. Pudotuspainolaitteen mittausten tu-

loksista saadaan selville myös taipumasuppilo, jonka perusteella voidaan analysoida huonojen mittaustulosten syitä.

Tiivistystyön kelpoisuus voidaan todeta myös mittaamalla tiivistetyn kerroksen tiheyksiä pistekohtaisesti radiometrisellä säteilymittalaitteella tai volymetrillä ja laskeamalla työmaalla mitatun tiheystuloksen ja kuivairtotiheyden maksimiarvon suhde eli tiiviyssaste. Kuivairtotiheyden maksimiarvo voidaan määrittää laboratoriossa paranneltulla Proctor- tai tärypöytämenetelmällä tai työmaalla koejyräyksellä [12]. Laboratoriomäärittelyyn käytetään myös kiertotiivistinlaitetta, vaikka sille ei ole laadittu yleisesti hyväksyttyä kuivairtotiheyden määrittämisen menetelmäkuvausta.

#### **2.1.2.2 Hamm-jyrän kalibrointiohjeet**

Hamm-jyrän tiivistyksen tarkkailulaitteen kalibrointiohjeen mukaan valitaan ja valmistetaan vähintään 20 m pitkä kalibrointialue, jolla voidaan tiivistää tuoretta kiviainesmateriaalia ja jonka eri kohdissa on vertailukelpoiset kosteudet, materiaalit, kerrospaksuus ja pohjaolosuhteet.

Ensimmäinen jyräyskaista tiivistetään kahdella ylityskerralla, toinen kuudella ja kolmas niin monella ylityskerralla, ettei tiiviyttä enää kasva. Jyräyskaistojen limitys sivusuunnassa on noin 10 % valssin leveydestä.

Tiivistämisen jälkeen valitaan jyrän PC:n näytöltä kalibrointipisteet. Kalibrointipisteet (vähintään 5 kpl/kaista) valitaan kohdista, joiden lähellä ei ole jyrämittarin mukaan suuria kantavuuden muutoskohtia.

Sen jälkeen ajetaan jyrä valittujen kalibrointipisteiden mukaisiin kalibrointimittauskohtiin. Kun jyrä on valitussa kohdassa, jyrävalssin viivakuorman keskikohta (=kalibrointimittauksen tarkka paikka) merkitään spray-maalilla tiivistetyn kerroksen pintaan ja tallennetaan nappia painamalla jyrän PC:n tiedostoon. Kun kalibrointimittauksen paikka merkitään tällä tavoin sekä tietokoneelle että maastoon, pystytään kalibrointimittaus suorittamaan tarkoin samasta kohdasta, josta on tallennettu jyrän tiivistyksen tarkkailulaitteen mittausarvo. Kun mittaukset tehdään kaikilla vertailtavilla menetelmillä samoista maastoon merkityistä pisteistä, ei eri menetelmien mittaustuloksiin tule paikannuseroista johtuvia virheitä.

Jyrän tiiviyksmittarin ja vertailulaitteen arvojen avulla piirretyn regressiosuoran korrelaatiokerroin tulee olla yli 0,7, jotta kalibrointi on riittävän hyvin onnistunut työmaan olosuhteissa. Jos korrelaatiokerroin on pienempi, tulee kalibrointi uusiksi. Jos uudellakaan kalibroinnilla ei saada riittävää korrelaatiota, voidaan olla tilanteessa, että kalibrointia ei pystytä suorittamaan vallitsevissa olosuhteissa. Silloin voidaan käyttää menetelmää, jossa rakenne tiivistetään joka kohdassa jyrämittarin mittausten perusteella maksimitiiviyteen ja varmistetaan alhaisemman tiiviyden omaavissa kohdissa pistekohtaisin laatumittauksin riittävä kantavuus, [6], [12].

#### **2.1.2.3 Caterpillar-jyrän kalibrointiohjeet**

Caterpillarin ohjeiden mukaan kalibrointialueen tulee olla vähintään 4 m leveä ja 15 m pitkä. Pohjamaan tulee olla kalibrointialueella sama kuin alueella, jolla kalibrointituloksia seuraavassa vaiheessa käytetään (maalaji, ominaisuudet 2 m syvyyteen, kosteuspitoisuus ja kaltevuus).

Kalibroinnin alussa ajetaan ensin yksi jyräskerta pohjamaan päällä (alhainen amplitudi, täry päällä). Suositeltava ajonopeus on välillä 2,5...4 km/h. Valitaan tarkoitukseen soveltuva, saatavilla oleva vertailulaite (esim. radiometrinen tiiviysmittari, levykuormituslaite). Paras korrelaatio saavutetaan Caterpillarin ohjeen mukaan käyttämällä dynaamista jäykkyyttä mittaavaa vertailulaitetta (dynaamisia pudotuspainolaitteita).

Jos pohjamaa tarvitsee enemmän tiivistämistä, jatketaan tiivistystyötä ”tuotantomoodilla” korkealla amplitudilla täry päällä, jotta saavutetaan maksimitiivistysvaikutus. Korkealla amplitudilla tärytyksen tiivistysvaikutus ylittää usein yli 2 m syvyyteen. Jyrän tiivistysentarkkailulaitteen mittausten perusteella jyrän PC laskee tiiviyyttä kuvaavat CCV-arvot, jota tallennetaan PC:n muistiin [9].

#### **2.1.2.4 Dynapac-jyrän kalibrointiohjeet**

Ruotsin Vägverket on julkaissut vuonna 1994 menetelmäohjeen, joka on samansisältöinen Dynapacin ohjeiden kanssa. Kalibrointialueet ja kalibroinnin suoritusohjeet eivät poikkea merkittävästi Hammin kalibrointiohjeista [5].

### **2.1.3 Kiertotiivistyskoemenetelmän kehitys**

#### **2.1.3.1 Kiertotiivistysmenetelmän sisältö**

Sitomattomat rakennekerrokset saavuttavat parhaat kantavuus- ja jäykkyysominaisuudet, kun ne on tiivistetty maksimikuivairtotehtyteen. Maksimikuivairtotehtyys saavutetaan, kun sitomaton rakennekerros tiivistetään (tiivistystyön kannalta) optimikosteudessa ja tiivistystyömäärä valitaan tiivistyskohteen olosuhteiden mukaan.

Perinteinen menetelmä sitomattomien kiviainesten maksimikuivairtotehtyden ja optimikosteuden määrittämiseksi on 1930-luvulla kehitetty ”Proctor-standardimenetelmä” tai sen yleisesti korvannut 1950-luvulla kehitetty ”Parannettu Proctor-menetelmä”. Proctor-menetelmät eivät ole sen jälkeen kehittyneet merkittävästi.

Kiertotiivistysmenetelmä on kehitetty USA:ssa asfalttimassojen laboratoriokokeiden näytevalmistusta varten. Ensimmäiset kiertotiivistimet otettiin käyttöön USA:ssa Texasissa vuonna 1939. Sittemmin kiertotiivistinlaitteita kehiteltiin useissa asfaltintutkimuslaitoksissa USA:ssa ja Ranskassa. Nykyinen asfalttimassojen näytevalmistuksen kiertotiivistysmenetelmän EN-standardi perustuu ranskalaisen LCCP:n konseptiin. Kuumana sekoitettavat asfalttimassat eivät sisällä tiivistystyövaiheessa vettä. Kiertotiivistimen avulla valmistetaan näytteet, joiden avulla valitaan asfalttimassojen optimisideainepitoisuus, optimirakeisuus ja tiivistettävyyden.

Proctor-menetelmien puute on materiaalikerroksen tiivistäminen iskuvasaralla, mikä ei vastaa tyypillistä työmaalla käytettävää jyrätiivistysmenetelmää. Proctor-kokeessa iskut voivat rikkoa kivirakeita ja muuttaa siten rakeisuutta. Kiertotiivistin tiivistää hiertävällä ja staattisesti puristavalla kiertoliikkeellä. Kiertotiivistimen kiertävä liike voi aiheuttaa näytteen kiviainesten lajittumista [17].

Jyrän tiivistystyön tulos on yhdistelmä hiertävien, värähtelevien ja staattisten voimien vaikutuksesta. (Montana 2006). Vuoden 1991 jälkeen julkaistujen kiertotiivistinmenetelmien tiivistysasetuksia on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Kiertotiivistinmenetelmien tiivistysasetuksia eri ohjeissa [17-20].

Vuosi	Laite tai menetelmä	Näytteen mitat		Paine	Kulma	Kierr. nop.	Tiivist. materiaali
		D (mm)	h (mm)	kPa	aste	rpm	
1991	Modified Gyratory Shear Test Machine, FHWA	152,4	95,3	600	0,5°-3°	30	Asfaltti
1991	Modified TX Highway Department, SHRP	152,4	95,3	600	vaihteleva		Asfaltti
1993	SHRP/ Superpave Gyratory Compactor (SGC), USA	150	115	600	1,25°	30	Asfaltti
1996	PCG3, LCPC, Ranska	150	100-150	500-800	0,5°-2°	6-30	Asfaltti
1997	Statens Vegvesen; Norja, Håndbok 198	100		600	1°	30	Kerros-stabilointi
1997	PANK-4115, CEN-ohje, Suomi, Asfalttimassan tiivistettävyyys	150	100-150	600	1°	30	Asfaltti
2007	Päällysrakenteen stabilointi, TIEH 2100055-07	150	150-170	600	1°	30	Kerros-stabilointi

#### 2.1.4 Tutkimuksia ja ohjeita kiertotiivistimen käytöstä

##### Suomi 1991

VTT teki vuonna 1991 vertailututkimuksen, jossa haettiin yhteyttä Proctor-kokeella ja ICT-kiertotiivistimen avulla määritettyjen kiviainesten maksimikuivairtotehiyden välillä. Tutkimus tehtiin käyttäen D 100 mm kiertotiivistinmuottia ja tiivistäen näytteet kolmessa eri kosteustilassa (Proctor-kokeen mukainen optimikosteus ja 40 % alaisempi sekä 40 % korkeampi kosteus).

ICT-kokeen tuloksista laskettavan kuivairtotehiyden ja kiviaineksen rakeisuuden avulla voidaan tutkimusraportissa esitetyllä kaavalla määrittää laskennallisesti ennustearvo Proctor-kokeen maksimikuivairtotehiyden. Menetelmää ei ole otettu yleiseen käyttöön [16].

##### Norja 1997

Norjalaisessa Telemark-projektissa kehitettiin v. 1997 menetelmä kylmänä sekoitet-tavan kantavan kerroksen bitumistabilointimassan maksimikuivairtotehiyden määrit-tämiseksi:

- kiertotiivistysnäytteen koko D 100 mm
- tiivistysparametrit CEN:n mukaiset (kallistuskulma 1°, paine näytteen pinnassa 600 kPa, kierrosnopeus 30 kierr/min)
- tiivistetään näytesarjaa (vähintään 3 rinnakkaisnäytettä) 200 kierrosta
- sen jälkeen tiivistetään tutkimusnäytteet (vähintään 3 kpl) märkäirtotehiyteen, joka on vähintään 96 % 200 kierrosta tiivistetyn näytteen märkäirtotehiydestä [19].

##### USA, Florida State University 2003

Floridan yliopistossa vertailtiin v. 2003 sitomattoman kiviaineksen laboratoriotiivis-tysmenetelmiä jyrätiivistykseen työmaalla. Sitomattoman kerroksen kiviaineksen op-timikosteuden ja maksimikuivairtotehiyden määrittämiseen kiertotiivistimellä suositel-

tiin seuraavia asetusarvoja: kallistuskulma 1,25°, paine näytteen pinnassa 200 kPa, kierrosnopeus 20 kierr/min. Kierrosmääräksi valittiin 90 kierrosta.

Tiivistyskokeen tuloksissa esitettiin graafisesti maksimikuivairtoteiheyden vesipitoisuuden funktiona. Maksimikuivairtoteiheyden luettiin käyrältä ja optimikosteus oli sitä vastaava näytteen kosteus [18].

#### USA, Montana 2006

Montanan yliopistossa USA:ssa tehtiin vuonna 2006 diplomityö SHRP:n kiertotiivistysmenetelmän (SGC= SHRP gyratory compaction) soveltuvuudesta sitomattomien materiaalien tiivistystöiden referenssimenetelmäksi.

Tutkimuksen perusteella suositeltiin, että sitomattomien materiaalien tiivistämisessä käytetään kiertotiivistimen asetuksina: kierrosnopeus 30 r/min, kulma 1,25°, paine näytteen pinnassa 600 kPa. Kierrosmääräksi suositeltiin laitteen sallimaa suurinta määrää [17].

#### Suomi (STABIL-projekti 2007)

Stabil-projektissa tiivistettiin maksimikuivairtoteiheyden määrittämiseksi valmistettujen näytteet D 150 mm kiertotiivistimellä. Näytteiden tavoiteteiveys ”95 % Parannetun Proctor-kokeen maksimitiiviydestä” korvattiin tavoiteteiiviydellä ”96 % ICT:n kierrosmäärää 200 r vastaavasta tiiviydestä”. Kiertotiivistyksen tavoitetaso (96 %) perustuu norjalaisen Telemark-projektin mukaiseen tiivistystavoitekriteeriin [20].

#### Suomi (Stabilointiohje 2007)

Stabilointiohjeen mukaan kerrostabilointinäytteiden tiivistyksen kannalta optimaalinen vesipitoisuus ja tavoiteteiveys määritetään kiertotiivistimellä tai Parannetulla Proctor-kokeella. Jos suhteituksen yhteydessä valmistetaan näytteitä, valitaan niiden vesipitoisuus siten, että massan kokonaisnestepitoisuus (lisäbitumi+vesi) tiivistyshetkellä vastaa tiivistämisen kannalta optimaalista nestepitoisuutta.

Näytteiden tavoiteteiveys muilla paitsi sementtistabiloinnilla (SST-massoilla):

- 95 % parannetusta Proctor-tiiviydestä (menetelmä SFS-EN 13286-2) tai
- 96 % kiertotiivistinlaitteella 200 r tiivistetyn näytteen kuivairtoteiheydestä.

SST-massan vastaavat tiivistystavoitteet ovat 96 % parannetusta Proctor-tiiviydestä tai 97 % kiertotiivistimellä 200 r tiivistetyn näytteen kuivairtoteiheydestä, [21].

Kun kiviaineksen maksimiraekoko ylittää 16 mm, näytteen halkaisijan tulee olla 150 mm. Isoja (D 150 mm) näytteitä suositellaan käytettäväksi myös hienorakeisemmilla stabilointinäytteillä. Yli 32 mm olevat kiviainesrakeet tulee poistaa ennen massojen valmistusta [21] ja saatu optimivesipitoisuus sekä maksimikuivairtoteiveys tulee korjata standardin SFS-EN 13286-2 mukaisesti yli 32 mm rakeiden osuuden perusteella. Ylisuurten rakeiden osuus saa olla korkeintaan 25 %. Jos se on enemmän, 150 mm Proctor- muotti ei sovellu maksikuivairtoteiheyden ja optimikosteuden määrittämiseen.

## 2.2 Jyräystutkimukset työmaalla

### 2.2.1 Tutkimuskohteet

Työmaaolosuhteissa tehdyt jyräystutkimukset ja niiden tulokset olivat tutkimuksen keskeinen sisältö. Jyräystutkimuksia tehtiin kolmella työmaalla käyttäen kolmea eri merkkistä jyrää.

#### 2.2.1.1 Tienrakennuskohteet Vihdissä

##### Vt 2 Vihti-Pori ST-urakka, Nummela

Vuonna 2008 Tiivi-projektin tiivistyskokeita suoritettiin Vihdin Nummelassa hankkeen ”vt 2 Vihti-Pori ST-urakka” kahdella uudisrakennuskohteella (yksityistiet Y5 ja Y8), taulukko 2 ja kuva 1. Hankkeen pääurakoitsija oli Skanska Infra Oy ja urakan tiivistysurakoitsija Tiehöyläpalvelu Alhontausta.

Koealueiden leveydeksi valittiin Nummelan tiekohteissa tiivistettävän alueen leveys (esim. sitomaton kantava kerros noin 7 m).

Tiivistystutkimuskoealueilla tehtiin mittauksia jyrän tiivistyksentarkkailulaitteilla. Lisäksi tehtiin mittauksia valituilla kantavuuden, tiheyden ja kosteuden mittauslaitteilla.

*Taulukko 2. Tiivistyskoealueet vuonna 2008.*

Pvm.		25.-26.6.2008	14.-15.7.2008	19.8.2008
Hanke		Vt2 Vihti-Pori ST-urakka	Vt2 Vihti-Pori ST-urakka	Vuosaaren satama
Kohde		Yyksityistie Y 5	Yyksityistie Y 8	Varastokenttä
Kunta		Vihti	Vihti	Helsinki
Pääurakoitsija		Skanska Infra Oy	Skanska Infra Oy	NCC Roads Oy
Tiivistysurakoitsija		Alhontausta	Pentti Tynjälä	NCC Roads Oy
Jyrä		HAMM	HAMM	HAMM
Jyrän paino	t	12	12	
Jyräysmenetelmä			33 Hz + pieni ampl	3 ylitystä 20 Hz+pieni ampl + 2 ylitystä 30 Hz+pieni ampl
Päällysrakenne		6,5/6,0 AB		
KERROKSET		Louhe 0/600 mm Jak Mk 0/56 mm 150 mm + kiilaus Mk 0/90 mm	Jak Mk 0/56 mm 200 mm hiekkä 60-70 mm	Murske 0/32 mm Murske 0/90 mm Merihiekkatäyttö
Kohteen pituus	m	1700		
Koealueen leveys	m	6,5		9,5
Kalibrointialueen pituus	m	120		100
Kalibrointipisteitä	kpl	12		



Kuva 1. Yksityistie Y5, Nummelan koekohde.

#### 2.2.1.2 Vuosaaren sataman varastokenttä Helsingissä

Toinen koekohde oli vuonna 2008 Helsingin Vuosaaren (Vuosa) sataman varastokentältä valittu koealue, kuva 2. Koekohteen leveydeksi valittiin noin 9,5 m. Kohteen pääurakoitsija oli NCC Roads Oy.



Kuva 2. Jyräyskoealue Vuosaaren sataman varastokentällä.



### 2.2.1.3 Kadunrakennuskohteet Espoon Suurpellossa

Vuonna 2009 tiivistyskokeita tehtiin useissa kadunrakennuskohteissa Espoon Suurpellossa. Kohteen pääurakoitsija ja tiivistystöiden urakoitsija oli Maanrakennusliike E. M. Pekkinen Oy. Suurpellon alueella pohjamaa on savea, jolle oli tehty pohjanvahvistus kalkkipilarien avulla. Kalkkipilarien yläpään on levitetty suodatinkangas ja yleensä joko moreenia 30–150 cm kerros tai louhetta. Moreenikerroksen oli tiivistänyt raskas työmaaliikenne. Jakavat ja sitomattomat kantavat kerrokset tiivistettiin jyräällä ja sen jälkeen tiivistystyötä jatkoi raskas työmaaliikenne.

Kadun ajoradan päällysrakenne (esim. Henttaan puistokatu)

- suodatinkerros (Hk, paksuus 200 mm)
- jakavan kerroksen yläpinta (Murske KaM 0/90 mm, paksuus 500 mm)
- sitomattoman kantavan kerroksen yläpinta (Murske KaM 0/32 mm, paksuus 220 mm).

Lukukujan koealueella Suurpellon kohteessa tehtiin jyräyskokeita sekä jakavan että sitomattoman kantavan kerroksen pinnalta, kuva 3.



Kuva 3. Tiehöylä levittää Suurpellon Lukukujan kantavan kerroksen mursketta, jota ajettiin samaan aikaan sekä murskaamolta että varastokasalta.

### 2.2.1.4 Koealueiden valinta

Tiivistystutkimuksen koealueeksi soveltuisi parhaiten liikenneväylän kohta, jolla ei ole suurta pituuskaltevuutta tai pienisäteistä kaarretta. Suuri sivukaltevuus (> 5 %) vaikeuttaa jyrän pysymistä ajolinjalla. Suuri pituuskaltevuus (> 5 %) aiheuttaa poikkeamia jyrän mittaustuloksiin eri ajosuunnissa. Suurpellon alueella koealueiden sijoituksessa kaltevuudet eivät tuottaneet ongelmia, koska alueella ei ollut merkittäviä korkeuseroja.



Koealueiden leveydet valittiin vastaamaan ko. rakenteen tiivistettävän alueen leveyttä (esim. jakavan tai sitomattoman kantavan kerroksen leveys). Koealueen sopivaksi tavoitepituudeksi valittiin noin 100 m. Koealueilla tulisi olla pohjaolosuhteiltaan homogeenisia osuuksia (joko pengertä tai leikkausta).

### 2.2.2 Jyrät

Vuoden 2008 tiivistyskokeissa käytettiin kahta Hammin täryjyrää. Kohteeseen Vt 12 Nummela Wirtgen Finland Oy toimitti Hammin 12 t pohjajyrän, kuva 4.

Jyrän valssin leveys oli 214 cm, valssissa oli yksi kiihtyvyyssanturi, joka oli asennettu valssin vasempaan päähän, kuva 7. Kiihtyvyyssanturin tuloksista lasketaan tiivistymistä kuvaava tunnusluku HMV (Hamm Measurement Value), joka ilmoitetaan suhteellisenä lukuna. Sen arvo riippuu mm. tiivistystavasta, tiivistysolosuhteista, tiivistettävästä rakenteesta ja materiaaleista.

Jyrä oli varustettu GPS-paikantimella, joka avoimella paikalla ei tarvitse tukiasemaa. Katvealueilla tukiasema voi olla tarpeen.

Vuosaaren satamakentällä käytettiin toista Hammin tiivistyksentarkkailulaitteella ja satelliittipaikantimella varustettua täryjyrää (omistaja NCC Roads Oy).

Vuoden 2009 tiivistyskokeissa käytettiin Caterpillarin, Dynapacin ja Hammin täryjyriä (kuvat 4-6). Jyrien tekniset tiedot maahantuojiin ilmoitusten mukaan on esitetty liitteessä 5.



Kuva 4. Täryjyrä Hamm 3412.



Kuva 5. Täryjyrä Caterpillar CS 56.



Kuva 6. Täryjyrä Dynapac CA302 DCo.



Kuva 7. Jyrän (Hamm) tiivistyksentarkkailulaitteen kiihtyvyysanturi.

### 2.2.3 Jyrän mittaustulosten kalibrointi työmaalla

Jyrän tiivistyksentarkkailulaite tuottaa tiivistettävästä rakenteesta kantavuutta (jäykkyyttä) kuvaavaa tietoa, joka riippuu alla olevan pohjamaan ja alempien kerrosten kantavuudesta sekä tiivistettävän kerroksen materiaalien rakeisuudesta, kosteudesta, kerrospaksuudesta ja saavutetusta tiiviysasteesta. Jyrän mittaustulos ilmoitetaan suhteellisen arvona joka riippuu tiivistysolosuhteista. Se ei kerro suoraan, täyttääkö tiivistystyö laatuvaatimukset.

Jotta jyrän mittaustuloksia osataan tulkita oikein, voidaan työkohteessa tehdä kalibroitimittauksia, joissa mitataan kalibroitikoealueen kantavuustieto sekä tiivistyksentarkkailulaitteella varustetulla jyrällä että tarkoitukseen soveltuvalla vertailulaitteella. Vertailulaitteen mittaustulosten tulee korreloida jyrämittarin vastaavien tulosten kanssa, jotta sitä voidaan käyttää jyrämittarin tulosten tulkintaan. Olennainen tekijä vertailulaitteiden valinnassa on niiden mittausten syvyysulottuvuus. Kevyet laitteet eivät pysty ottamaan huomioon syvemmällä olevien kerrosten vaikutusta rakenteen kantavuusominaisuuksiin tai mittaustuloksiin. Jos vertailulaite ei korreloi jyrämittarin tulosten kanssa, jyrän kenttäkalibrointi tällä menetelmällä ei onnistu.

Tiivi-projektissa saatujen tutkimustulosten perusteella laadittu ohje sitomattomien materiaalien jatkuvatoimisesta tiivistystarkkailusta ja jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen kalibroinnista tiivistyskohteen olosuhteiden mukaan on esitetty liitteessä 1.

## 2.3 Laatumittaukset

### 2.3.1 Laboratoriokokeet

VTT teki Nummelan kohteiden kantavan kerroksen materiaaleille tiivistyskokeita parannetulla Proctor-menetelmällä ja ICT-kiertotiivistysmenetelmällä. Kokeilla määritettiin materiaalin maksimikuivairtoteisyys ja optimikosteus, ks. kohta 3.4.



### 2.3.2 Urakkaan kuuluvat laatumittaukset

Urakoitsija teki koekohteissa urakkasopimuksen mukaiset materiaalien, tiivistystöiden ja valmiiden kerrosten sekä rakenteiden laatumittaukset. Urakoitsijan laatumittauksiin sisältyneet levykuormituskoetulokset on esitetty liitteessä 7 ja pudotuspainolaitteen (Raskas Loadman) kantavuusmittaustulokset liitteessä 8.

### 2.3.3 Tiivi-projektiin kuuluvat laatumittaukset

Kalibrointikoealueilta tehtiin vertailumittauksia kalibrointimittauspisteistä seuraavilla laitteilla:

- raskas pudotuspainolaite "Dynatest" (VTT), kuva 8,
- raskas pudotuspainolaite "Heavy Loadman" (AL-Engineering Oy:n laite, jolla VTT mittasi vuonna 2008. Maatekniikka Oy teki vastaavat mittaukset vuonna 2009), kuva 9.
- Levykuormituslaite, jonka vastapainona käytettiin kaivinkonetta (v. 2008 Raimo Peräkylä Oy), kuva 10
- Troxler 3411-B (radiometrinen tiheys- ja kosteusmittaus, VTT), kuva 11).



Kuva 8. Pudotuspainolaite Dynatest.



Kuva 9. Pudotuspainolaite Heavy Loadman.



Kuva 10. Levykuormituslaite.



Kuva 11. Troxler 3411 tiheys- ja kosteus mittari

## 3 Tulokset

### 3.1 Nykytilaselvitys

#### 3.1.1 Tiivistystöiden laatuvaatimukset

InfraRYL edellyttää, että ennen penkereen ja päällysrakennekerrosten tiivistämistä tutkitaan tiivistettävän maalajin optimivesipitoisuus ja maksimikuivairtotehiys. Ki-  
viaineksen optimivesipitoisuus ja kuivairtotehiyden maksimiarvo voidaan määrittää  
laboratoriossa parannetulla Proctor-kokeella.

InfraRYL [12] esittää maalajin perusteella taulukon 3 mukaiset tyypilliset arvot opti-  
mivesipitoisuudelle ja maksimikuivairtotehiydellet. Tyypillistä optimivesipitoisuutta  
voidaan käyttää esim. lähtökohtana, kun valitaan Proctor-kokeissa tarvittavia koe-  
kappaleiden vesipitoisuuksia, jos asiasta ei muutoin ole saatavissa tarkempaa tietoa.

*Taulukko 3. Tyypilliset optimivesipitoisuudet ja maksimikuivairtotehiydet  
(Infra RYL).*

Maalaji	Optimivesi- pitoisuus	Maksimikuiva- irtotehiys
	%	kg/m <sup>3</sup>
Sora, soramoreeni	7	2100
Hiekka	10	2000
Siltti	20	1700
Savi	25	1600
Hiekkamoreeni ja silttimoreeni	7	2200

Työmaalla tiivistettävään kerrokseen tulisi ohjeiden mukaan lisätä tarvittaessa vettä  
optimikosteuden saavuttamiseksi.

Tiivistettävän kerroksen vesipitoisuus ja kuivairtotehiys voidaan mitata työmaalla li-  
kimääräisesti radiometrisillä mittalaitteilla, esim. Troxler 3411. Suoramittaus raken-  
teeseen työnnetyllä anturilla antaa luotettavamman kuvan rakenteen tiiviydestä kuin  
kerroksen yläpinnan päältä tehty ainetta rikkomaton pintamittaus.

Jos pengertä rakennettaessa maan vesipitoisuuden ja optimivesipitoisuuden ero on  
yli 4 prosenttiyksikköä, ei 95 % tiiviyssuhdevaatimusta yleensä saavuteta. Jos tiiviyssu-  
hdevaatimus on 90 %, ei maan vesipitoisuuden ja optimivesipitoisuuden ero saa  
olla yli 6 prosenttiyksikköä (InfraRYL).

Kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus riippuu tiivistettävän materiaalin laadusta ja  
käytettävästä tiivistyskalustosta. Jokainen tiivistettävä kerros ja pengertäytteen ylä-  
pinta tiivistetään koko leveydeltään käyttäen kerrospaksuuden mukaan kuhunkin tar-  
koitukseen soveltuvaa tiivistyskalustoa ja tiivistyskertamäärää.

Sopiva tiivistyskertamäärä erilaisille kerrospaksuuksille voidaan selvittää koejy-  
räyksen tai kokemuseräisten ohjearvojen avulla. InfraRYL:ssä on esitetty ohjeellisen jy-  
räyskertamäärän riippuvuus tiivistettävän kerroksen tyypistä, kerrospaksuudesta, jy-  
räyskalustosta ja jyräystavasta.

Sitomattoman kantavan tai jakavan kerroksen tiivistystyön laatu varmistetaan työkohtaisesti sovittavalla tavalla tai jollakin seuraavan ohjeen tavoista. Tiivistystyön laadun on täytettävä valitun menetelmän vaatimukset.

InfraRYL2010:n mukaan vaatimustenmukaisuus voidaan selvittää joillakin seuraavista tavoista:

- Kerroksen kuivairtitiheys mitataan kalibroidulla säteilymittarilla ja lasketaan mittaustuloksen ja maksimikuivairtitiheyden suhde (tiiviysaste). Sen tulee olla keskimäärin vähintään 95 % ja yksittäisen arvon tulee olla vähintään 90 %. Kuivairtitiheyden maksimiarvo määritetään InfraRYL:n mukaan koetiivistyksellä tai laboratoriossa käyttäen parannettua Proctor- tai tärypöytämenetelmää. Proctor-menetelmää (150 mm muotilla) voidaan käyttää kiviainekselle, josta 75–100 % läpäisee 31,5 mm seulan. Tärypöytää taas voidaan käyttää kiviainekselle, jonka maksimiraekoko on pienempi kuin 80 mm ja 0,063 mm seulan läpäisy on alle 12 %. Tärypöytää ei ole tiettävästi vielä käytetty Suomessa tähän tarkoitukseen.
- Jos päällysrakennekerroksen murskeen maksimiraekoko on enintään 125 mm tai jos materiaali on luonnonsoraa, voidaan tiivistystyön laatu selvittää mittaamalla pudotuspaino- tai levykuormituslaitteen avulla tiiviyssuhde  $E_2/E_1$ . Tiiviyssuhteelle on annettu vaatimukset InfraRYL:ssä.
- Jos päällysrakennekerroksen murskeen tai luonnonsoran maksimiraekoko on enintään 80 mm ja kerrospaksuus alle 300 mm, voidaan tiiviyssuhde selvittää InfraRYL:n mukaan myös kevyellä pudotuspainolaitteella.
- Jatkuvasti mittaavalla ja dokumentoivalla jyrällä voidaan osoittaa tiivistystyön laatu, jos tiivistystä on jatkettu niin kauan, että jyrämittarin arvot eivät ole enää parantuneet ja jos kahdesta huonoimmasta jyrämittariarvot antaneesta kohdasta tiiviyssuhteet täyttävät vaatimukset.
- Voidaan käyttää myös menetelmää, jolla osoitetaan, että jyräys on tehty InfraRYL:n taulukossa 18110:T3 annettuja ohjeita noudattaen.

Ohjeiden sallimat lukuisat vaihtoehtoiset tiivistysmenetelmät voivat johtaa siihen, että työkohteessa käytetään tiivistystyön kelpoisuuden osoittamiseen halvinta menetelmää, esim. pelkästään InfraRYL:n ylityskertojen ohjeellista jyrän valinta- ja jyräyskertamäärätaulukkoa. Se sisältää paljon kokemusperäistä tietoa ja soveltuu tiivistystyön suunnittelun apuvälineeksi, mutta ei kelpoisuuden toteamismenetelmäksi. Jyrä ja tiivistysmenetelmä tulisi valita tiivistettävän kohteen olosuhteiden perusteella mahdollisuuksien mukaan taulukon ohjeita noudattaen. Tiivistyskaluston valinnassa tulee ottaa huomioon mm. kohteen laajuus, materiaalin rakeisuus ja tiivistettävän kerroksen paksuus.

Jos valitaan liian kevyt jyrä tai väärät jyrän asetusarvot (amplitudi, frekvenssi, ajonopeus) materiaali ei tiivisty parhaalla tavalla. Tästä syystä jyrän tyyppi ja paino sekä jyrästyössä käytetty amplitudi, frekvenssi, ajonopeus ja jyräyskertamäärät tulisi tallentaa tiivistystulosten yhteyteen. Luotettavin tapa tallentaa nämä tiedot on käyttää jatkuvasti mittaavaa ja mittaustulokset tallentavaa jyrää.

Jakavan ja sitomattoman kantavan kerroksen vaatimustenmukaisuus voidaan InfraRYL:n mukaan osoittaa myös kevyellä Loadmanilla. Se mittaa olennaisesti ohuempaa

pintakerrosta kuin raskaammat pudotuspainolaitteet, levykuormituskoe tai täryjyrän tiivistyksentarkkailulaite. Kevyttä Loadmania ei pitäisi käyttää tähän tarkoitukseen, kun luotettavampia laitteita on tarjolla.

Kevyen pudotuspainolaitteen salliminen vaihtoehtona tarkemmille menetelmille sekä jakavalla että sitomattomalla kantavalla kerroksella voi johtaa siihen, että työkohteeseen ei valita siihen soveltuvaa tiivistystyön laadun mittauslaitetta, koska kevyemmän laitteen saa halvemmalla.

Optimikosteus voidaan määrittää etukäteen esim. Proctor-kokeella tai kiertotiivistimellä. Kiertotiivistimen käytöstä optimikosteuden määrittämiseen ei ollut Tiivi-projektin toteutusaikana käytössä yleisesti hyväksyttyä menetelmäohjetta.

Käytännössä kuivairtitiheyden maksimi-arvo määritetään yleisesti työmaalla koetiivistyksen (liite 3) avulla, koska urakoissa ei vaadita usein Proctor-koetuloksia tai tiivistettävän kerroksen kiviaines on niin suurirakeista, ettei siitä voi tehdä Proctor-koetta. Koetiivistys voi kuitenkin antaa virheellisen tuloksen, jos koetiivistystä ei tehdä tiivistettävän materiaalien optimikosteudessa.

### **3.1.2 Dynaaminen tiivistyksentarkkailumenetelmä**

#### **3.1.2.1 Laatuvaatimukset**

Pohjamaan, penkereen ja rakennekerrosten hyvin suoritettu tiivistäminen on keskeinen lähtökohta infrarakenteiden laadulle ja pitkälle käyttöiälle. Tiivistystyön vaatimustenmukaisuuden osoittamistavalla on ratkaiseva merkitys.

Eri maissa voimassa olevia määräyksiä ja kansainvälisen geoteknillisen yhdistyksen ohjeiden ja vaatimusten yhteenvedo on esitetty taulukossa 4.

Toistaiseksi tiivistöiden laadunmittaus on Suomessa perustunut pistekohtaisiin menetelmiin (tiheys- ja kantavuusmittaukset yms).

Jotta pistekohtainen laadunmittaus olisi mahdollinen, joudutaan tyytymään vähäisiin näytemääriin verrattuna laatumittauksia vastaavaan pinta-alaan. Poikkeukset tasalaatuisuudesta voidaan määrittää vain tilastollisesti edellyttäen, että näytemäärä on riittävä.

Vaihtoehto pistekohtaisille tiivistystöiden laatumittauksille on koko tiivistettävän alueen kattava jatkuvatoiminen dynaaminen tiivistyksentarkkailumenetelmä. Kuten menetelmän nimikin kertoo, kyse on tiivistyksen tarkkailutavasta, joka kattaa koko tiivistettävän alueen. Rakenteen tiivistymistä rakennustyön aikana mitataan jyrän täryvalssiin asennetun kiihtyvyyssanturin avulla. Sen käytön edellytys on valssin värähtely, joka saadaan aikaan yhden tai useamman valssin sisäpuolella pyörivän epäkeskon avulla.

Ruotsalainen Geodynamik Ab kehitti vuonna 1978 ensimmäisen täryjyrään asennetun tiivistyksentarkkailulaitteen, jota kutsutaan nimellä Compactometer. 1980-luvulla alkoivat lähes kaikki jyränvalmistajat tarjota omaa tiivistyksenmittaussysteemiään.

Tämän tiivistyksentarkkailulaitteen ensimmäisten positiivisten kokemusten jälkeen Saksan Liikenneministeriö käynnisti eräällä moottoritietyömaalla Münchenin lähellä tutkimushankkeen, jossa oli tarkoitus selvittää mittaussysteemin soveltuvuus maa- ja tierakenteiden tiivistämiseen työmaaolosuhteissa karkearakeisilla materiaaleilla.

Taulukko 4. Jyrän tiivistysentarkkailulaitteen kalibroinnin suoritusohjeita ja tiivistysvaatimuksia [3], [4], [5] ja [10].

	Laite	Kalibr. alue	ohje	Dokumentointi	Tiivistysvaatimus	Ajonopeus	Taajuus
Mn/DOT (2006 TH 64)	Sileävalssi-täryjyvä (11 t)	Min. 91 m x 10 m. Maks. paks. 1,2 m	1 kalibrointi / rakenne tai materiaali	Tiivistys, Jäykkyys, Kosteus, Vertailumitt. (viikkorap.)	90 % jäykkyysmittauksista tulee täyttää 90 % tiiveystavoitteesta	Sama kalibroinnissa ja muussa tiivistyksessä	
ISSMGE *)	Kokemus-peräisesti valittu jyvä	Pituus 100 m, leveys = työmaan leveys	Homogeeninen tasainen pinta, Jyräyskaistojen limitys $\leq 10\%$ valssin leveydestä	Jyräyskaavio, jyräysjärjestys, ylityskerrat, amplitudi, nopeus, dynaamiset mittausravot, frekvenssi, valssin hyppääminen, sijaintitiedot	Korrelaatiokerroin $\geq 0,7$ . Minimiarvo $\geq 95\%$ $E_{v1}$ :stä, mediaani $\geq 100\%$ (hypyn aikana $\geq 100\%$ ). Jyrän dynaaminen mittausravot $\leq$ valittu minimi enintään $10\%$ :lla kaistan pituudesta. Mitattu minimi $\geq 80\%$ valitusta minimiarvosta. Mitattu maksimi $\leq$ kaistan valittu maksimi. Keskihajonta $\leq 20\%$ ylityskerran mediaanista.	Vakio 2-6 km/h $\pm 0,2$ km/h	Vakio ( $\pm 2$ Hz)
Itävalta	Sileällä valssilla ja kumipyörillä varustettu täryjyvä	Pituus 100 m, leveys = työmaan leveys	Ei epähomogeenisuutta lähellä pintaa (materiaalin tai kosteuden osalta). Kaistan limitys $\leq 10\%$	Tiivistyssuunnitelma, jyräysjärjestys, ylityskertojen lukumäärä, hyppääminen ja sijaintitiedot	Sama kuin ISSMGE:n ohje	Vakio 2. 6 km/h $\pm 0,2$ km/h	Vakio ( $\pm 2$ Hz)
Saksa	Itsekulkeva kumipyörävetoinen jyvä. Hinattava täryjyvä myös soveltuva.	Kussakin kalibroinnissa vähintään 3 osa-aluetta, kukin noin 20 m pitkiä	Tasainen, ei lätäköitä. Sama maalaji, vesipitoisuus, kerrospaksuus ja alustan kantavuus. Kaistan limitys $\leq 10\%$ valssin leveydestä.	Dynaaminen mittausravot, frekvenssi, ajonopeus, hyppääminen, amplitudi, pituus, mittausravotkohta, jyrätyyppi, maalaji, kerrospaksuus, pvm, kellonaika, tiedoston nimi, , sääolosuhteet, koelueiden sijainti, jyräys-suunta, absoluuttinen korkeusasema, paikalliset olosuhteet, jyrän parametrit, poikkeamat	Regression korrelaatiokerroin $\geq 0,7$ .	Vakio	
Ruotsi	Täry- tai oskilloiva 1-valssijyvä. Minimi viivakuorma 15-30 kN.	Maksimi kerrospaksuus 0,2-0,6 m	Homogeeninen kerros, ei jäässä. Suojakerros $< 0,5$ m voidaan tiivistää yhdessä jakavan kerr. kanssa.		Kantavuus- tai tiiviysastevaatimukset tulee saavuttaa.	Vakio 2,5-4 km/h	

\*) ISSMGE = International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering



Edellä mainitusta saksalaistutkimuksesta saatujen erinomaisten kokemusten perusteella käynnistettiin vuonna 1983 täydentävä tutkimus- ja kehityshanke sekarakeisilla ja hienorakeisilla maa-aineksilla. Tutkimuksessa selvitettiin toisaalta dynaamisen mittaussysteemin eri tekijöiden väliset riippuvuudet ja toisaalta dynaamisen menetelmän ja klassisten tiivistyksen tarkkailun menetelmien tunnuslukujen väliset riippuvuudet. Tutkimukset tehtiin yhteistyössä Geodynamikin kanssa kehitetyn tutkimus Compactometerin avulla kolmella suurella rakennustyömaalla [1].

### **3.1.2.2 Mittausperiaate**

#### **3.1.2.2.1 Älykäs tiivistäminen**

Täryjyrän valssin pyörivät epäkeskot saavat tiivistysajon aikana valssin värähtelemään. Valssin liike-energia siirtyy värähtelyn avulla maahan ja aiheuttaa maan tiivistymisen samalla, kun maan tiivistysalustan jäykkyys ja iskunvaimennus muuttuvat. Värähtelevän valssin kiihtyvyyssmittaukset ja niiden analysointi tekevät mahdolliseksi tehdä johtopäätöksiä tiivistetyn alueen jäykkyydestä tai tiiviyydestä.

Dynaamisessa tiivistyksen tarkkailussa voidaan käyttää täryjyrää sekä tiivistyslaitteena että mittaustulosten analyyttiseksi. Jyrän sijaintitieto tiivistystyön aikana määritetään GPS:n avulla. Seuraavassa esitellään kaksi tiivistyksen tarkkailulaitteen mittaussysteemiä.

#### **3.1.2.2.2 Compactometer**

Compactometer-tiiviysmittari koostuu kiihtyvyyssanturista, sähkösignaalia käsittelevästä mikroprosessorista ja mittaustulosten analogisesta näytöstä. Kiihtyvyyssanturi on kiinnitetty rummun pyörimättömään, vaimentamattomasti värähtelevään rakenneosaan. Compactometer kehitettiin Ruotsissa ja se esiteltiin julkisesti ensi kerran vuonna 1980.

Compactometer kuvaa maan tiiviyssuhdetta analysoimalla värähtelevän rummun kiihtyvyyssmittaustuloksia. Lisäksi tallennetaan valssin pystysuora värähtelykomponentti esivahvistetulla piezosähköisellä kiihtyvyyssmittarilla.

Pyörivän epäkeskon keskipakovoiman ja rummun hitausvoiman tasapainotila tuottaa rummun värähdellessä vapaasti täysin elastisella alustalla säännöllisen sinimuotoisen värähtelyn (perusaalto). Tiivistettävän maa-aineksen jäykkyydestä riippuen kohdistuu sinimuotoiseen värähtelyyn särö so. ylivärähtelyaallot muuttavat perusaaltoa. Tämän jaksottaisen värähtelyn taajuus vastaa valssin värähtelytaajuutta.

Tämä jaksottainen värähtely jaotellaan sähköisellä suodatuksella eri taajuuksien sinimuotoisiin komponentteihin (perusaaltoon ja yliaaltoihin.) Tutkimusten mukaan yhdistetyn värähtelyn ensimmäisen yliaallon amplitudi on merkittävä perusaallon vaimennuksen kannalta ja samalla maan tiivistyksen kannalta. Muihin yliaaltoihin kohdistuu jyrän laitteista aiheutuvia häiriöitä eikä niitä oteta siksi huomioon mittaustuloksissa.

Tuloksista lasketaan jyrätyn pinnan tiivistystilaa kuvaava dimensioton tunnusluku CMV (Compaction Meter Value) [1], [2].

### 3.1.2.2.3 Terrameter

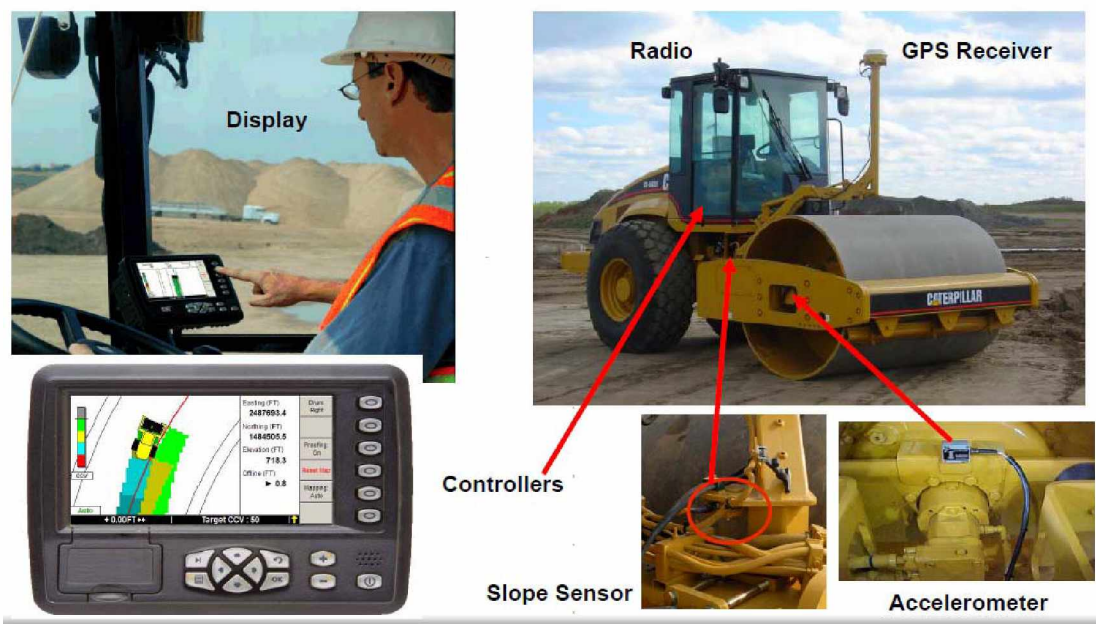
Jyränvalmistaja Bomag kehitti vuonna 1993 jyräkohtaisen Terrameter-tiivistyksen-tarkkailulaitteen. Se mittaa alustan tiivistilaa energiataseen perusteella. Bomag Terrameter (BTM) koostuu anturista, laskentamoduulista, näytöstä ja ohjausyksiköstä. Anturiyksikkö on rummun vasemmassa päässä kiinnitettynä kiinteästi värähtelevään, ”ei pyörivään” osaan tärytysmoottorin yläpuolelle.

Liike-energiasta osa kuluu maa-aineksen tiivistystyöhön ja loput palautuu jyrän valssiin. Alustan tiivistämiseen kuluva liike-energia riippuu kullakin hetkellä alustan tiivistilasta tai jäykkyydestä. Maaperän vastaanottama värähtelevän rummun aktiivinen teho voidaan laskea maan vastevoiman aikaansaaman maan yläpinnan deformaation avulla.

### 3.1.2.3 Satelliittipaikannus ja tiedonsiirto

Jyrän tiivistyksen tarkkailulaitteen mittaustulokset kerätään jyrän tietokoneelle. Jyrän mittaustuloksiin voidaan liittää jyrän GPS-vastaanottimen keräämä jyrän sijaintitieto jatkuvana mittauksena. Mittaus- ja niihin yhdistetyt paikkatietotulokset voidaan siirtää jyrän tietokoneelta joko muistitikun avulla tai esim. radioteitse tai GSM:n avulla langattomasti työmaan tukikohtaan tai laadunvalvonnalle.

Kuvassa 12 on esitetty esimerkki Caterpillarin jyrän tiivistyksen tarkkailusovelluksesta, jossa jyrän laitteet mittaavat tiivistyttä kuvaavan tiedon, pinnan kaltevuuden ja jyrän sijainnin. Mittaustieto siirretään jyrästä laadunvalvonnan käyttöön radioteitse. Tiedon siirto on periaatteessa samanlaista kuin muissakin työkoneissa, joissa käytetään langatonta tiedonsiirtoa.



Kuva 12. Caterpillar-jyrän tiivistyksen tarkkailulaitteen näyttö, kiihtyvyyssanturi, kaltevuusanturi, GPS-vastaanotin ja radiolaite tiedonsiirtoon (Viite valmistajan esite).

Jyräskoealueilla jyrän GPS:n paikantamien kalibrointimittauspisteiden sijainti mitattiin myös työmaan toimesta robottitakymetrillä (kuva 13) ja kannettavalla ”satelliittilautasella” (kuva 14). Satelliittilautasella mitattiin myös vertailupisteiden koordinaatit, kun jyrän sijaintitiedon koordinaatisto muunnettiin työmaan rakennussuunnitelmien mukaiseen koordinaatistoon.



Kuva 13. Robottitakymetri Trimble.



Kuva 14. Satelliittilautanen Trimble.

## 3.2 Jyräystutkimukset vuonna 2008 Nummelassa

### 3.2.1 Yleistä

### 3.2.2 Jyrien ja jyrän mittauslaitteiden käytön opastus

Hamm-jyrän tehtaan edustaja Ralf Schröder opasti työmaalla Vihdin Nummelassa 26.–27.6.2008 tutkimuksessa käytettävän jyrän ja sen yhteydessä käytettävien laitteiden käytön (tiivistyksentarkkailulaite, GPS, mittautiedon tallennus ja käsittely).

### 3.2.3 Tiivistysentarkkailulaitteen kalibrointi työmaalla

Yksityistietä Y5 (vt2/Nummela) valittiin kalibrointikoealueeksi noin 120 m pituinen osuus (plv 1500...1620). jolta valittiin 12 kpl kalibrointipisteitä. Pisteet valittiin jyrän tiivistysentarkkailulaitteen mittaustulosten perusteella ja paikannettiin jyrän GPS-paikantimella. Näistä pisteistä tehtiin jyrän tiivistysentarkkailulaitteen vertailumittauksia seuraavilla kantavuudenmittauslaitteilla:

- pudotuspainolaite "Dynatest" (VTT)
- pudotuspainolaite "raskas Loadman" (AL-Engineering Oy:n laite, jolla VTT mittasi)
- pudotuspainolaite "kevyt Loadman" (Peräkylä Oy)
- Levykuormituskoe (Peräkylä Oy), taul 5.

Lisäksi tehtiin tiheys- ja kosteusmittauksia käyttäen suoramittausmenetelmää Troxler 3411-B laitteella.

Nummelan koekohteissa VTT mittasi kustakin kalibrointipisteestä kantavuudet ensin Dynatest pudotuspainolaitteella ja sen jälkeen raskaalla Loadman-pudotuspainolaitteella. Raimo Peräkylä Oy teki samoissa pisteissä ensin levykuormituskokeet ja sen jälkeen kantavuusmittaukset kevyellä Loadman-pudotuspainolaitteella. Levykuormituskokeissa oli vastapainona pyöräalustainen kaivinkone.

Hammin ohjeen mukaan tiivistysentarkkailulaitteen lukeman ja kalibrointipisteistä mitatun vertailuarvon korrelaatiokertoimen tuli olla  $R > 0,7$ , jotta mittaustulokset hyväksyttiin kalibrointi-arvoiksi työkohteen homogeenisille osuuksille.

*Taulukko 5. Jyrän kalibrointimittaustulosten vertailumenetelmät.*

	Mittauksen suoritti	Tiivistyskohde		
		Vt 2/Vihti yksityistiet	Vuosa satamakenttä	Suurpelto kadut
Dynatest pudotuspainolaite	VTT	x	x	
Raskas Loadman pudotuspainolaite	VTT	x		x
Raskas Loadman pudotuspainolaite	Maatek Oy			x
Kevyt Loadman pudotuspainolaite	Peräkylä Oy	x		
Levykuormituskoe	Peräkylä Oy	x		
Levykuormituskoe	HKR		x	
Troxler, suoramittaus	NCC Roads Oy		x	
Troxler, suora- ja pintamittaus	VTT	x		x
Proctor (laboratoriokoe)	VTT	x		x
Proctor (laboratoriokoe)	NCC Roads Oy		x	
Kiertotiivistin ICT (laboratoriokoe)	VTT	x		x

Pudotuspainolaitteilla tehtiin laitteiden käyttöohjeiden mukaan kussakin mittauskohdassa ensin yksi esikuormitus (tiivistyspudotus). Sen avulla pyrittiin ensisijaisesti tasoittamaan kuormituslevyn alapuolella oleva maanpinta. Esikuormituksen vaikutuksesta myös mitattava kerros tiivistyy. Esikuormituksen tiivistysvaikutus riippuu esikuormituksen pudotuspainon massasta ja pudotuskorkeudesta. Pudotuskorkeutta voidaan säätää työmaalla. Pudotuspainolaitteiden käyttöohjeissa ei ole kuitenkaan kerrottu, millä kuormalla tai pudotuskorkeudella esikuormitus tehdään. Esikuormituksen suuruutta ja sen tiivistysvaikutusta ei myöskään tallenneta mittauksen yhteydessä, joten esikuormitusta ei raportoida mittausselostuksessa.

Esikuormituksen (tiivistyspudotuksen) jälkeen tehdään kaksi tai kolme ns. mittauspudotusta. Mittauspudotusten tulosten perusteella lasketaan tiiviyssuhde ( $E_2/E_1$ ), joka on toisesta mittauskuormituksesta lasketun kantavuusarvon suhde ensimmäisestä kuormituksesta laskettuun kantavuusarvoon. Valmiiden sitomattomien rakennekerrosten tiiviyssuhteille ( $E_2/E_1$ ) on asetettu InfraRYL:ssä vähimmäisvaatimukset. Tiiviyssuhteen vähimmäisvaatimuksen arvo riippuu mittauskohdan  $E_2$ -kantavuudesta.

Sitomattomien rakennekerrosten pudotuspainomittauksen esikuormitus tulisi valita siten, että se tasoittaa kuormituskohdalla olevan mittausalueen pinnan, mutta ei tiivistä kerrosta merkittävästi. Jos esikuormitus valitaan liian suureksi, saadaan sen jälkeen tehtävien mittauspudotusten perusteella korkeammat  $E_1$  ja  $E_2$ -arvot ja todellista parempi tiiviyssuhde  $E_2/E_1$ .

Edellä olevan perusteella sitomattomien rakenteiden pinnalta tehtyjen pudotuspainomittausten esikuormituksen suuruus tulisi yhtenäistää laitemerkkikohtaisesti ja merkitä se myös laitteiden käyttöohjeisiin. Mittauskohteissa käytetyn esikuormituksen suuruus ja esikuormituksen tulokset tulisi tallentaa mittauksen aikana ja raportoida laitteen normaalin tulostuksen yhteydessä.

### **3.2.4 Kalibrointimittaukset**

#### **3.2.4.1 Kalibrointimittauksen suoritus**

Tutkittava jyrä tiivistä ennen kalibrointimittauksia koekentän kohteeseen valitulla tiivistysmäärällä. Sen jälkeen valittiin jyrän PC:n näytössä näkyvästä tiivistetyn alueen eri kohtien suhteellista tiivistysarvoa esittävästä kuvasta silmämääräisesti 12 mittauspistettä, joilla oli mahdollisimman erilainen kantavuuslukema jyrän mittarin mukaan.

Jyrä ajettiin vuoroin kullekin kalibrointipisteelle ja jyrän sijaintikoordinaatit kalibrointipisteen kohdalla tallennettiin jyrän PC:n tiivistysmittaustiedostoon. Samaan sijaintipisteeseen maalattiin merkki valssin keskikohdan alla olevaan murskepintaan (valssin ”viivakuorman keskelle”). Näin referenssimittauspiste oli tiivistyskaistan keskilinjalla ja vastasi mahdollisimman hyvin jyrän valssin keskimääräistä tiivistyskohtaa kohdassa.

Vertailumittaukset kalibrointilaitteilla tehtiin tästä samasta kohdasta tai mahdollisimman läheltä sitä.

Jyrän tiiviysomittarin ja kalibrointilaitteen tuloksista laskettiin lineaarinen regressio. Hammin ohjeiden mukaan vaatimus kalibrointituloksen riittävän hyvälle korrelaatiolle oli  $R > 0,7$ . Jos tätä ei saavuteta, kalibrointia ei voitu suorittaa riittävällä tarkkuudella.

#### **3.2.4.2 Kalibrointimittaukset Nummelassa (kohde Y5)**

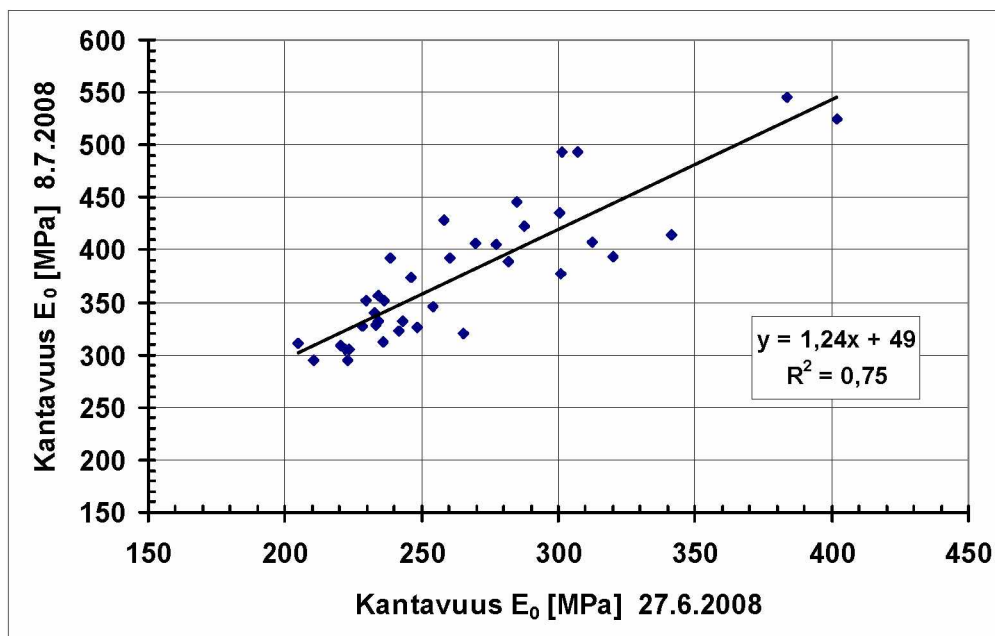
Yksityistiellä Y5 tehtiin 25.–26.6.2008 Hamm-jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen kalibrointimittauksia. Ensimmäisissä kalibrointikokeissa yksityistiellä Y5 korrelaatiot tiivistyksentarkkailulaitteiden ja vertailulaitteiden välille jäivät alhaisiksi eikä koealueella saavutettu riittävän hyvää riippuvuutta ( $R > 0,7$ ) jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen ja vertailulaitteiden tulosten välille. Myös eri vertailulaitteiden välinen korrelaatio oli heikko. Näiden mittausten tuloksia on esitetty liitteessä 4.

Mittausmenetelmien heikon korrelaation arvioitiin johtuneen tässä kohteessa siitä, että tiivistetyssä rakenteessa oli lohkareen kulmia lähellä yläpintaa. Jyrän valssin dy-



naaminen kantavuusarvo tallentui mittausten menetelmästä johtuen yksittäisellä jyräys-kaistalla kaistan leveyssuunnassa aina vakiosuuruisena koko valssin leveydeltä. Jos valssin ja tiivistettävän kerroksen kosketusviivalla on kantavuudeltaan erilaisia kohtia, korostuu kantavimman kohdan vaikutus (esim. lähellä pintaa olevan lohkarkeen kulma). Vertailulaitteet mittaavat kantavuuden tai tiiviyyden pistemäisesti kalibrointipisteen kohdalta, joka voi jäädä lohkarkeiden väliin.

Yksityistien Y5 kalibrointikoealueen sitomattomat kerrokset valmistuivat 27.6.2008. Kuvassa 15 on esitetty rakenteen kantavuuden muuttuminen 11 vrk aikana sen jälkeen. Molemmilla kerroilla mittaukset on tehty samoista pisteistä Dynatest pudotuspainolaitteella. Kantavuus nousi merkittävästi. Esim. jos jonkin kalibrointipisteen 27.6. mitattu kantavuus oli 250 MPa, oli regressioyhtälön mukaan laskettu saman pisteen kantavuus 11 vrk myöhemmin noin 360 MPa (muutos +44 %). Kantavuuden nousuun vaikutti mm. rakenteen kuivuminen ja työmaaliikenne, kuva 15.



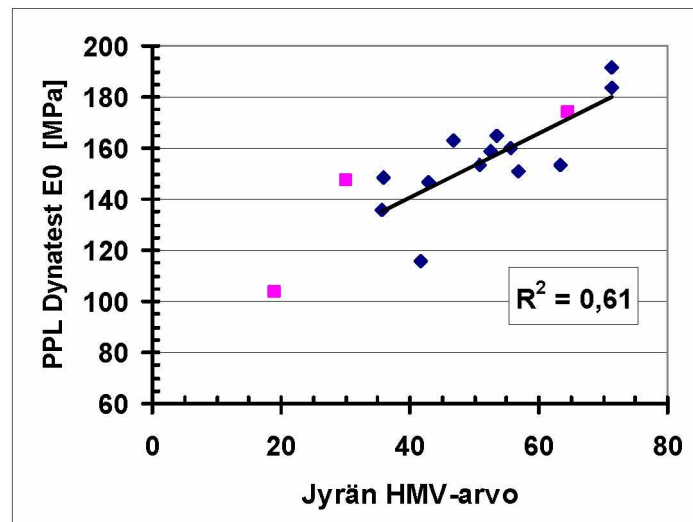
Kuva 15. Sitomattomien kerrosten kantavuuden nousu kalibrointipisteissä 11 vrk aikana (Pudotuspainolaite Dynatest, kohde Y5/Nummela).

Kohteen kantavuustavoite oli työmaan ilmoituksen mukaan 170 MPa päällysteen päältä ja 135 MPa sitomattoman kantavan kerroksen päältä. Nämä tavoitteet ylitettiin.

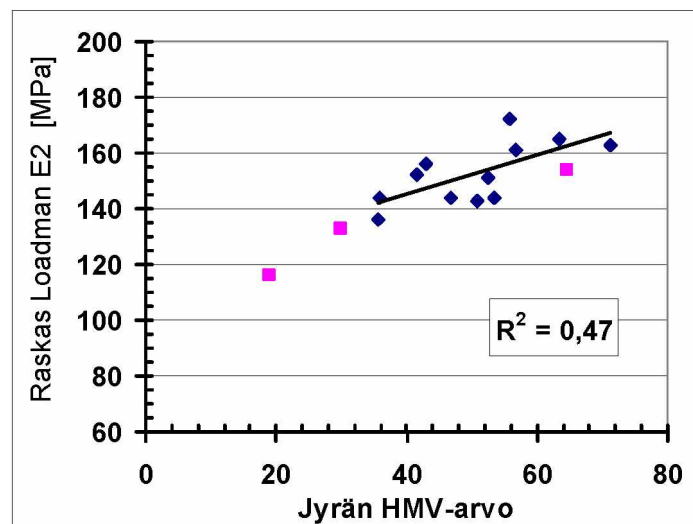
### 3.2.4.3 Kalibrointimittaukset Nummelassa (kohde Y8)

Seuraava tiivistyskokeilu suoritettiin 14.–15.7.2008 yksityistiellä Y8 Nummelassa. Myös tässä kohteessa tehtiin kalibrointimittaukset Hammin jyrälle. Kohteessa Y8 murske levitettiin ja tiivistettiin hiekkakerroksen päälle, mikä poikkesi kohteen Y5 rakenteesta.

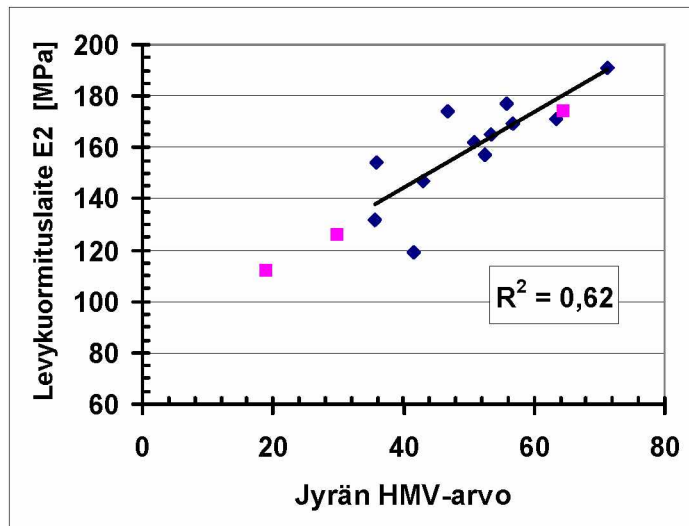
Kuvissa 16–18 on esitetty Dynatest-pudotuspainolaitteen ja raskaan Loadman-pudotuspainolaitteen sekä levykuormituskokeen tulosten riippuvuus Hamm-jyrän mittaamasta, suhteellisesta tiivyyttä kuvaavasta arvosta (HMV) kohteessa Y8. Kuvissa siniset pisteet ovat kalibrointipisteitä ja punaiset pisteet ovat kalibroinnin jälkeen kalibrointialueen ulkopuolelta samassa kohteessa tutkittuja lisäpisteitä.



Kuva 16. Dynatest pudotuspainolaitteen kantavuusarvon riippuvuus Hamm-jyrän tiiviyslukumasta (HMMV kohde Y8 sitomaton kantava kerros).



Kuva 17. Raskaan Loadmanin kantavuusarvon riippuvuus jyrän tiiviyslukumasta (kohde Y8 sitomaton kantava kerros).



Kuva 18. Levykuormituskokeen kantavuusarvon  $E_2$  riippuvuus jyrän tiiviyslukemasta (kohde Y8 sitomaton kantava kerros).

Taulukossa 6 on esitetty kolmen eri kantavuudenmittauslaitteen mittaustuloksen ja Hammin jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen mittaustulosten välinen korrelaatiokerroin R. Hammin kalibrointiohjeen mukaan tiivistyksentarkkailulaitteen lukema vastasi riittäväällä tarkkuudella kaikilla kolmella em. vertailulaitteella mitattua vaatimussuuretta.

On huomattava, että tulos päti vain kalibrointialueen sitomattoman kantavan kerroksen materiaaleille, rakenteille ja olosuhteille. Jos ne muuttuvat, tulee tehdä uusi kalibrointi.

Taulukko 6. Referenssilaitteiden kantavuusmittaustulosten ja Hamm jyrän tiivistyksentarkkailutuloksen korrelaatio kohteessa Y8/ vt 2 Nummela.

Referenssilaitte	Kohde	
	Vt2, Nummela, Y8	
	$R^2$	R
Pudotuspainolaite Dynatest	0,61	<b>0,78</b>
Levykuormituslaite	0,62	<b>0,79</b>
Puotuspainolaite raskas Loadman	0,47	<b>0,68</b>

#### 3.2.4.4 Vuosaaren sataman varastokentän mittaukset

Vuosaaren sataman (Vuosa) varastokentällä tehtiin NCC Roads Oy:n Hamm-jyrän kalibrointimittaukset. Valmiiksi tiivistetyltä koealueen (sitomaton kantava kerros) kalibrointimittauspisteiden sijaintikohdat valittiin jyrän PC:n näytöltä ja sen jälkeen jyrä ajettiin vuorotellen kullekin pisteelle.

Kalibrointimittauspisteet jäivät (urakoitsijasta riippumattomista syistä) merkitsemättä jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen tietokoneelle jyrän ollessa kalibrointipisteen kohdalla. Tästä syystä muista koealueista poiketen kohteen kalibrointipisteiden sijainti määritettiin jälkikäteen takymetrillä ja liitettiin erikseen jyrän mittaustiedostoon.



Jos jyrän GPS:n paikkatieto poikkasi takymetrin paikkatiedosta, aiheutui siitä sijainti-  
virhe jyrän mittaustuloksiin. Vuosaaren varastointikentän kalibrointialueella oli lisäk-  
si useita kaivonkansia, joiden väistäminen vaikutti jyrän ajolinjoihin.

Jyrän tiivistyksen tarkkailutuloksilla oli heikko korrelaatio Dynatest-pudotuspaino-  
laitteen ja levykuormituslaitteen tulosten kanssa. Käytetyn paikannustavan puutteet  
vaikeuttivat tämän koalueen tulosten tulkintaa.

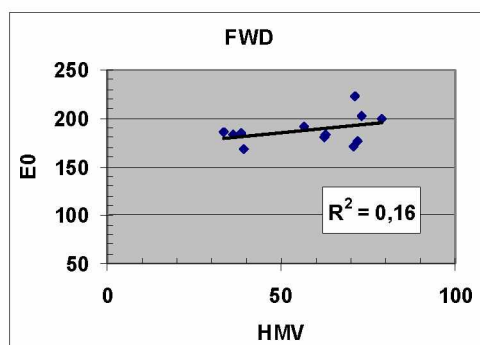
Kalibrointipisteiden sijaintitietojen mahdollisen virheen vaikutusta laitteiden mitta-  
ustulosten väliseen korrelaatioon sitomattomalla kantavalla kerroksella arvioitiin  
herkkyysanalyysin avulla seuraavasti:

- oletettiin, että pisteiden sijaintitiedoissa on enintään 40 cm paikannusvirhe (joh-  
tuen kahden eri tavoin määritetyn sijaintitiedon mahdollisista eroista ja mahdol-  
lisesta GPS:n paikannusvirheestä),
- yhden kalibrointipisteen (p-04) lähellä oli kohta, jossa tiiviysmittarin lukema  
muuttui jyrkästä arvosta 69 lukemaan >96. Tämä ero saattoi johtua syvemmillä  
olleesta erittäin kantavasta rakenteesta, jonka jyrän mittari olisi havainnut sy-  
vemmältä kuin vertailulaitteet. Näillä oletuksin on aineistolle tehty koeluonteises-  
ti ”herkkyysanalyysi-tyyppinen ”Ennen-jälkeen”-korjaus taulukon 7 mukaisesti.  
Korjauksen vaikutus on korrelaatioon esitetty kuvissa 19 ja 20.

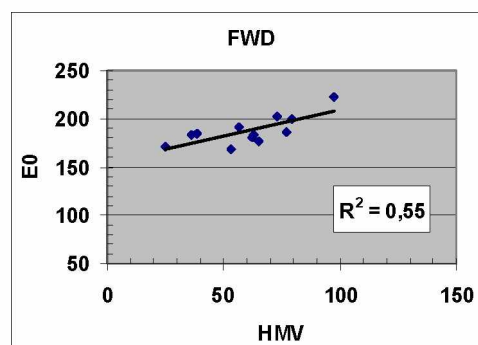
Taulukko 7. Jyrän GPS:n ja takymetrin tuloksen mahdollisen sijaintieron vaikutuksen  
herkkyysanalyysi (punaisella merkitty muutetut sijaintitiedot).

pudotus	piste	HMV	E0	LK_E2	HMV_vaiht	etäisyys_ mitatusta	
3	1	79,0	200	191	79,0	0	
3	2	62,2	180	167	62,2	0	
3	3	72,1	177	185	65,1	0,37	
3	4	71,3	222	180	97,1	1,26	vieressä poikkeavan tiivis alue
3	5	73,0	202	193	73,0	0	
3	6	62,8	183	167	62,8	0	
3	7	56,7	192	178	56,7	0	
3	8	39,3	168	150	53,2	0,20	
3	9	38,6	185	162	38,6	0	
3	10	70,9	171	163	24,8	0,22	
3	11	33,3	186	185	77,1	0,32	
3	12	36,0	183	165	36,0	0	

ENNEN



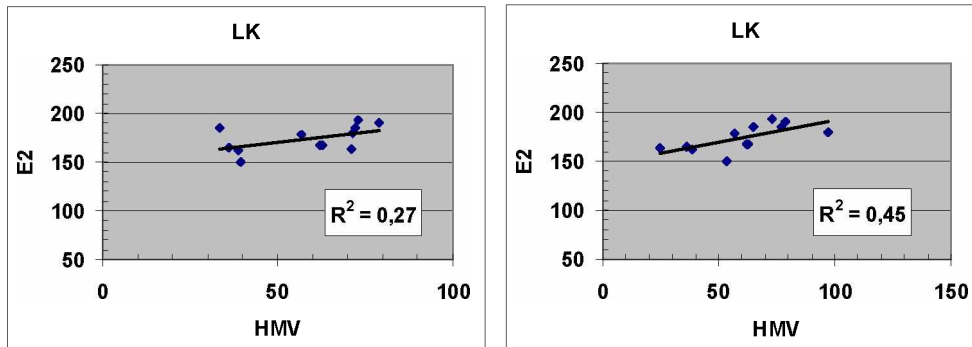
JÄLKEEN



Kuva 19. Dynatest-pudotuspainolaitteen kantavuusarvon  $E_0$  riippuvuus Hamm-  
jyrmittarin tiivistysarvosta (ennen ja jälkeen kalibrointipisteiden sijain-  
tikorjauksen).

ENNEN

JÄLKEEN



Kuva 20. Levykuormituslaitteen kantavuusarvon E2 riippuvuus Hamm- jyrämitarin HMV- tiivistysarvosta ennen ja jälkeen kalibrointipisteiden sijaintikorjauksen.

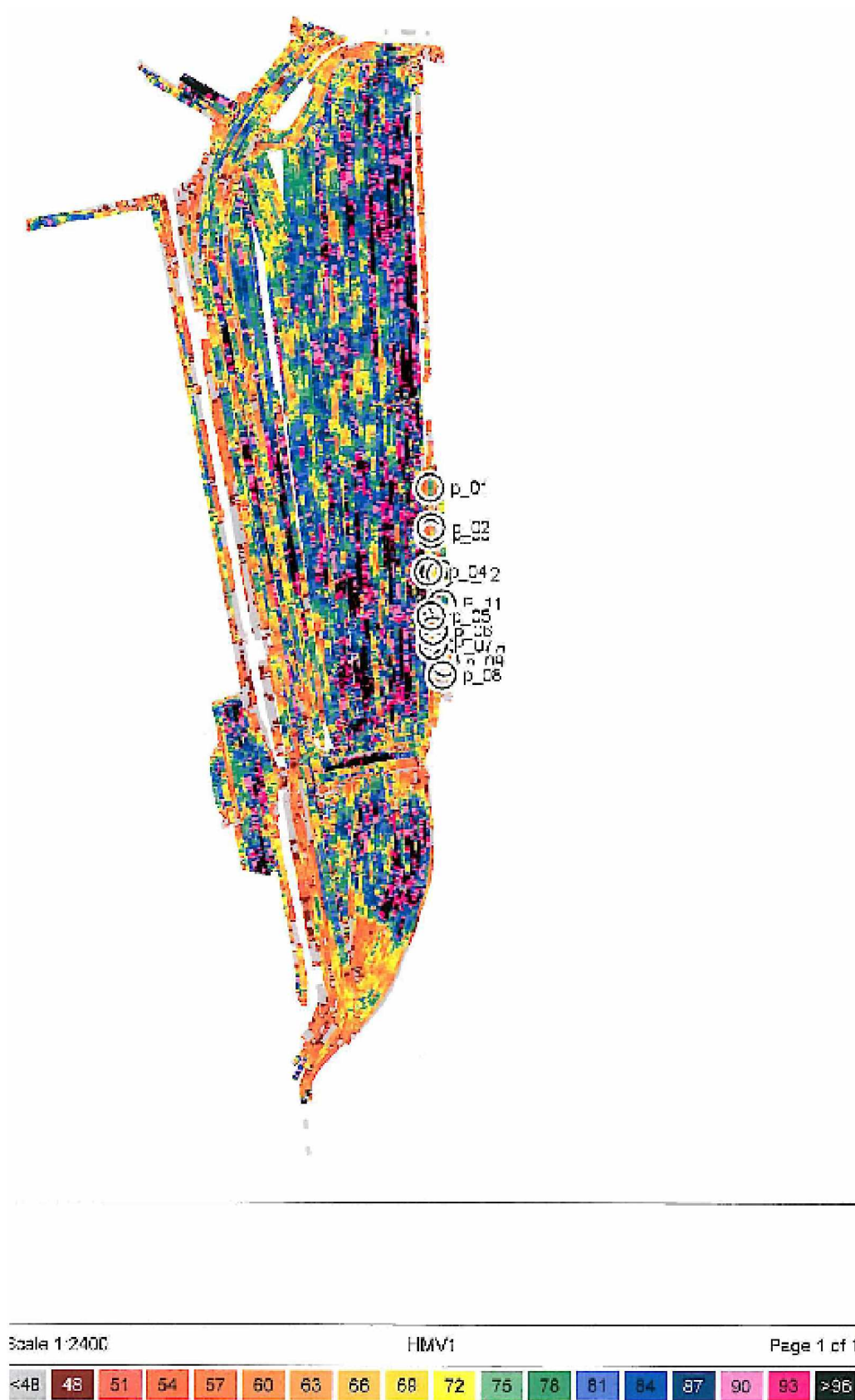
Jyrän tiivistyksentarkkailulaite antaa saman tiivistysarvon koko valssin leveydelle ja luokittelee ne PC:n näytöllä portaittain värikoodein. Tästä seuraa, että:

- jyrän tuottamassa tiivistyskuvassa saattaa näyttää siltä, että vierekkäisten jyräyskaistojen limityskohdissa on suurempia tiivistyseroja kuin todellisuudessa.
- Jos tiivistettävän alueen pintaan ulottuu yksittäisen lohkarkeen särmä, jyrä tulkitsee kantavuuden erittäin korkeaksi lohkarkeen särmän yli kulkiessaan, vaikka jyrän valssin ja alustan kosketusviivan kohdalla saattaa olla samaan aikaan toisia huonosti tiivistyneitä kohtia, joiden tiivistymisen lohkarke estää.

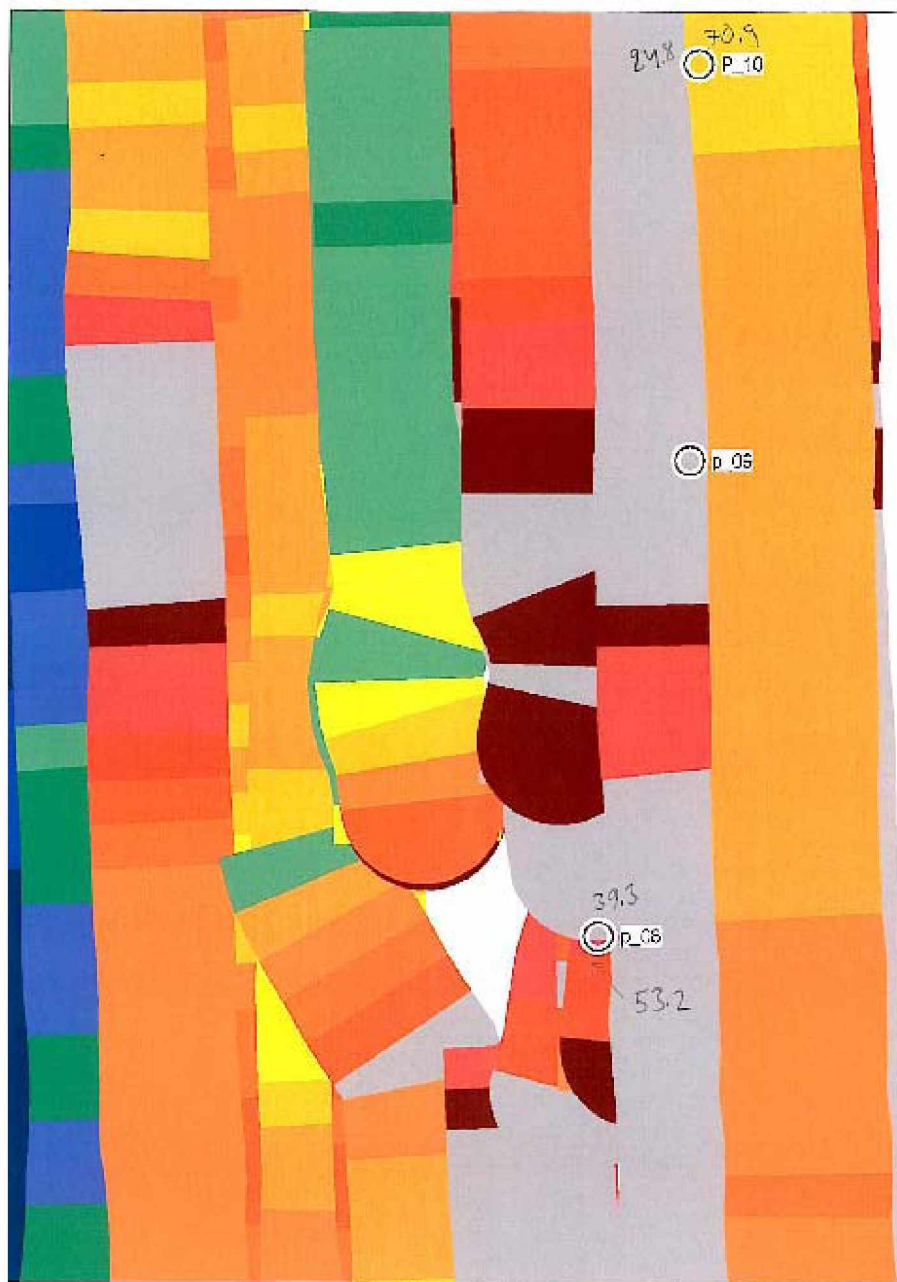
Jyrän mittauslaitteen tiivyyttä (kerroksen jäykkyyttä) kuvaava suhteellinen mittaus-tulos on esitetty kuvissa 21–23 eri väreillä esitettyinä luokkina. Hamm-jyrän mittausarvot ilmoitettiin jyrämerkkikohtaisina HMV-arvoina (HMV = Hamm meter value).

Kalibrointipisteiden sijainti pyrittiin valitsemaan siten, etteivät ne olleet lähellä tiivistysmittaustulosten muutoskohtia. Kuvassa 22 näkyy useiden pisteiden sijainti lähellä muutoskohtia, joista pyrittiin välttämään. Tämä on seuraus edellä kuvatusta paikannuksen puutteista tässä kohteessa.

Kalibrointipisteiden sijainnin merkitsemiseen jyrän PC:n tiedostoon kiinnitettiin tämän kokeilun jälkeen erityistä huomiota sekä kalibrointien suorittajien että jyräkuljettajien opastuksessa ja ohjeistuksessa.



Kuva 21. Vuosaaren sataman varastokenttä ja ympäröillä merkittyjen kalibrointipisteiden sijainti varastokentän reunassa.



Scale 1:67

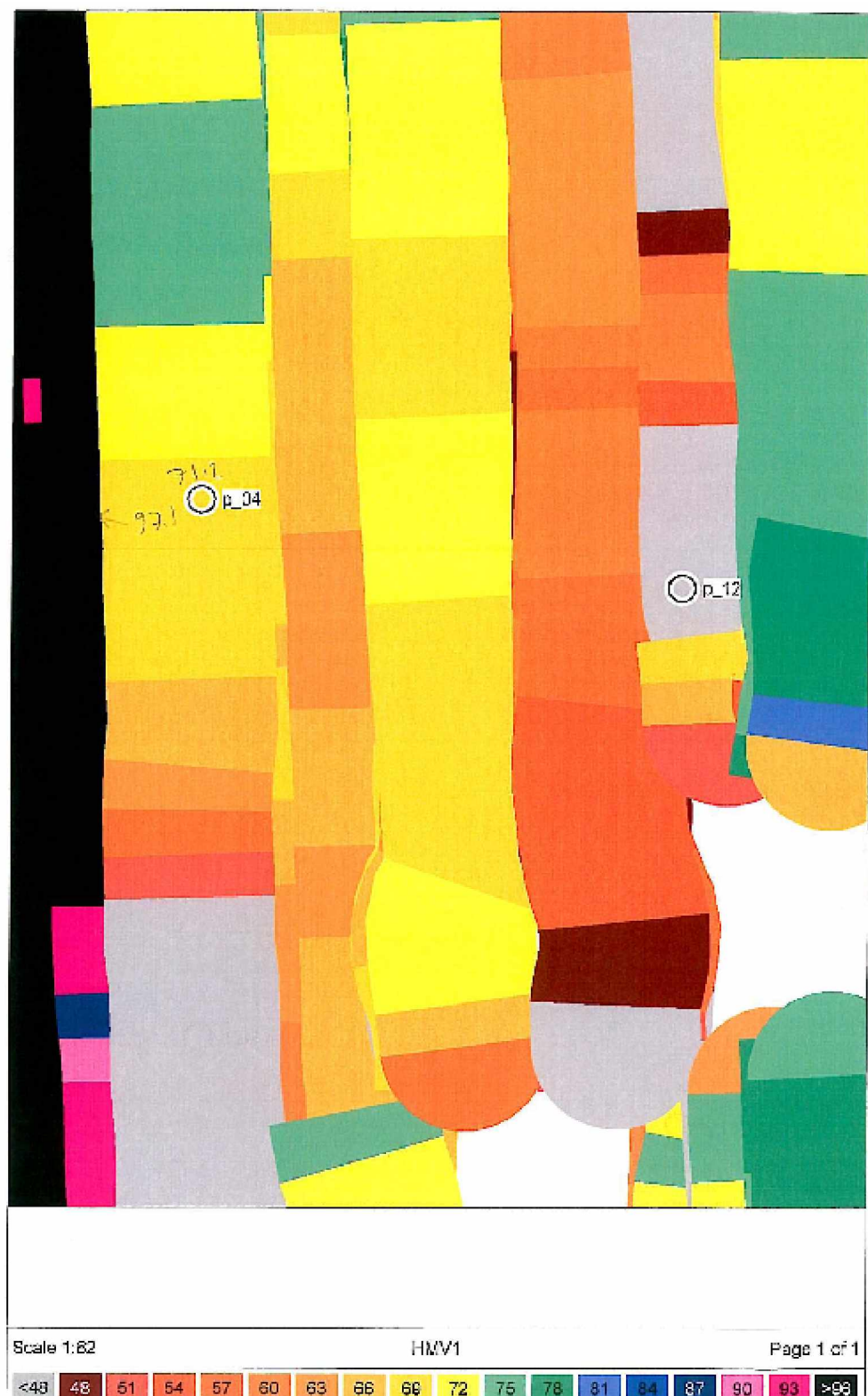
HMV1

Page 1 of 1



Kuva 22. Herkkyysanalyysi kalibrointipisteen mahdollisen sijaintivirheen vaikutuksesta tiiviysarvoon (Vuosa, osasuurennos kuvasta 21).





Kuva 23. Kalibrointikentän tiivistysmittaustulosten vaihtelu. (Vuosaari, osasuurenno kuvasta 21).

### 3.3 Jyräystutkimukset 2009 Suurpellon kohteissa

#### 3.3.1 Yleistä

Jyräystutkimukset tehtiin loka-marraskuussa 2009 Espoon Suurpellon kadunrakennuskohteissa. Tiivistettävät alueet olivat katujen sitomattomia kantavia tai jakavia kerroksia. Kaikissa tutkimuskohteissa oli tehty pohjanvahvistus kalkkipilaristabiloinnilla.

#### 3.3.2 Koealueet

##### Kiviaineksen kosteus

Sitomattomien kantavien ja jakavien kerrosten murskeet hankittiin osittain ostomurskeena ja osittain mursketta ajettiin suoraan murskaamolta. Murskaamolta tuleva murske oli erittäin kuivaa. Rakenteesta otetuista murskenäytteistä tutkitut kosteudet olivat taulukon 8 mukaiset.

*Taulukko 8. Suurpellon tiivistyskohteiden rakenteesta otettujen murskenäytteiden vesipitoisuudet (kuivatus-punnitus- ja Troxler-menetelmä).*

Näytteen- otto	Kohde	Kerros	Näyte	Vesipitoisuus		
				Kuivaus- punnitus	Troxler suoramitt	Troxler pintamitt
pvm			nro	%	%	%
20.10.2009	Lukukatu	Kantava	PL86	2,5	3,9	3,6
			PL113	3,6	4,2	4,4
28.10.2009	Lukukuja	Jakava	Piste3	2,9		4,3
			Piste8	1,4		2,9
5.11.2009	Lukukuja/ jk+pp-tie	Kantava	näyte1	1,8	2,2	2,1
			näyte2	2,9	2,0	1,8
20.10.2009	Henttaan puistokatu	Jakava	Piste4	1,2	4,2	1,7
			Piste8	1,4	3,3	1,7
28.10.2009	Henttaan- kaari	Kantava	Piste3	3,3		4,4
			Piste4	2,6		3,2

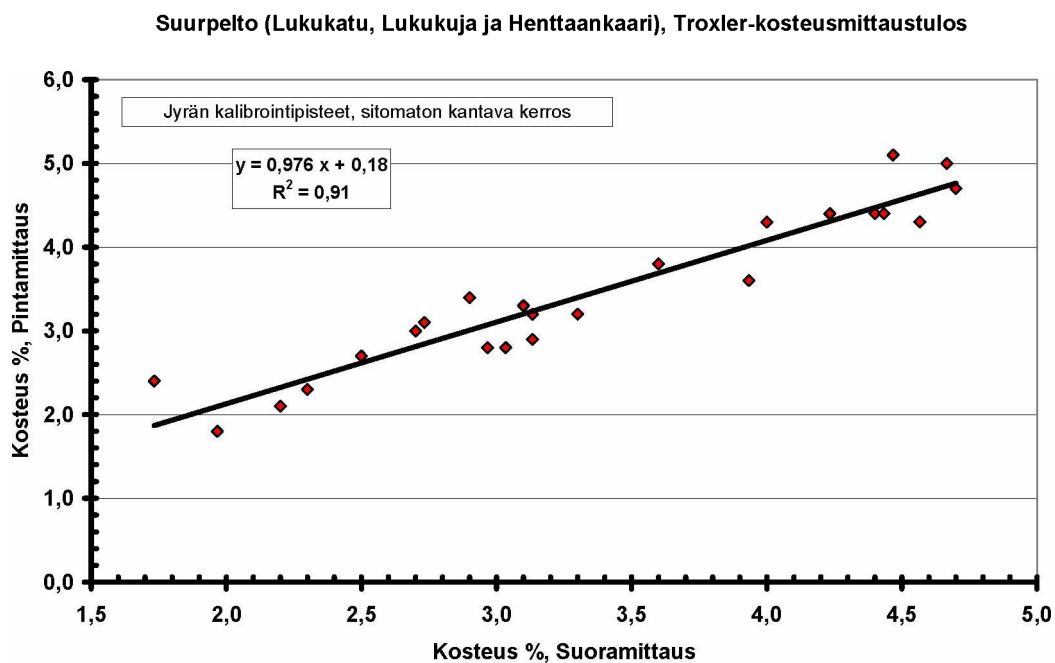
Koealueiden kosteuspitoisuus mitattiin kalibrointipisteissä kuivauspunnitusmenetelmällä ja radiometrisellä Troxler 3411-B-laitteella. Troxler-laitteella voidaan käyttää kahta eri tiheyden- ja yhtä kosteudenmittausmenetelmää:

- suoramittauksessa lyötiin tutkittavaan kerrokseen ensin mittausreikä teräspiikillä ja työnnettiin reikään sen jälkeen säteilyvarsi mittaussyvytyteen,
- pintamittauksessa ei säteilyvartta työnnetty tutkittavan kerroksen sisään, vaan mittaus tehtiin kerroksen pinnan päältä.

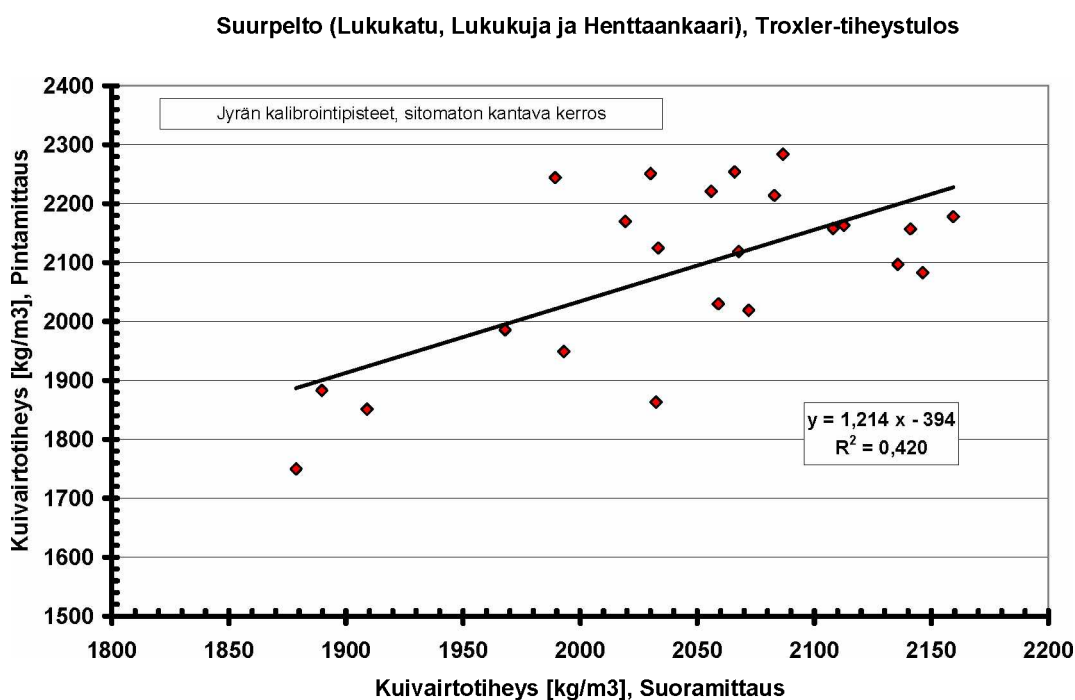
Samoista mittauskohdista alhaisimpia kosteuspitoisuuksia antoi yleensä kuivatuspunnitus-menetelmä, taulukko 8. Tämä voi johtua siitä, että mitattavan kerroksen yläosan kosteus oli suurempi kuin alaosan. Troxler- laite mittaa kosteutta vain noin 7–8 cm syvyyteen asti ja silloinkin aivan yläpinnan lähellä olevan materiaalin kosteuden vaikutus tuloksiin on paljon suurempi kuin laitteen mittaussyvyyden alarajalla olevan

materiaalin kosteuspitoisuuden. Kuivatuspunnitusta varten näyte oli otettu Troxler-laitteen mittaussyvyyttä paksummasta kerroksesta.

Kuvassa 24 on esitetty vertailu kolmen Suurpellon rakennuskohteen kadun sitomatoman kantavan kerroksen murskeen kosteusmittauksista ja kuvassa 25 vertailu tiheysmittauksista Troxler-laitteen suora- ja pintamittausmenetelmillä.



Kuva 24. Troxler-laitteen pinta- ja suoramittausmenetelmien kosteudenmittaustulosten välinen riippuvuus.



Kuva 25. Troxler-laitteen pinta- ja suoramittausmenetelmien tiheydenmittaustulosten välinen riippuvuus.

Suoramittaus antaa useiden tutkimusten mukaan luotettavamman tuloksen, mutta se on työläämpi eikä sitä voida käyttää, jos reiäntekopiikkiä ei pystytä lyömään tutkittavaan kerrokseen. Jakavan kerroksen kiviaines sisältää usein niin suuria kiviainesrakeita, että mittauksia ei voida tehdä suoramittauksena samaan tapaan kuin sitomattomalla kantavalla kerroksella.

Mittausanturin työntämistä suuren maksimiraekoon omaavaan kerrokseen voidaan helpottaa käyttämällä apuna teräslevyä, jonka yläpintaan on kiinnitetty metalliputki ohjaamaan reiäntekopiikki kohtisuoraan tien pintaan nähden.

Myös teleskooppiputkia voidaan käyttää samaan tarkoitukseen, ks. liite 3. Teleskooppiputket asennetaan kerrokseen jo ennen tiivistämistä tai niin kevyen tiivistyksen jälkeen, että asennus onnistuu helposti ja putki pysyy oikeassa asennossa. Putken yläosa laskeutuu tiivistyksen aikana kerroksen yläpinnan mukana. Ennen mittauksia otetaan pois teleskooppiputken korkki ja työnnetään mittausanturi putken sisään. Tämän menettelyn etuna on myös se, että tiheysmittaukset pystytään toistamaan täsmälleen samoista kohdista, jolloin tuloksista voidaan todeta tiivistyskertojen vaikutus tiheyteen.

Sitomattoman kantavan kerroksen kosteuden mittauksessa Troxler-laitteen pintamittausmenetelmä korreloi erittäin hyvin samoista kohdista suoramittausmenetelmällä saatujen mittauksien tulosten kanssa, kuva 24.

Sen sijaan samojen pisteiden tiheysmittauksissa pinta- ja suoramittausmenetelmien välinen korrelaatio oli merkittävästi heikompi, kuva 25.

Tämä johtuu siitä, että kosteutta mittaava radioaktiivinen Americum-säteilylähde sijaitsee laitteen pohjassa, joten sitä ei suoramittauksessakaan työnnetä tutkittavaan kerrokseen. Kosteus mitataan siten pinta- ja suoramittauksissa samalla tavalla ja kuvassa 24 on siten todellisuudessa käytännössä verrattu kosteuden toistomittauksien välistä korrelaatiota. Sen sijaan tiheyttä mittaava Cesium-säteilylähde sijaitsee laitteen säteilyvarren päässä ja se työnnetään suoramittauksessa rakenteen sisään.

Pintamittausmenetelmän tiheystulosten keskiarvo on kuvassa 25 esitetyissä mittauksissa alle 2 % suurempi kuin suoramittausmenetelmän. Pintamittauksien vaihteluväli on kuitenkin lähes kaksinkertainen. Sekä suurin että pienin tiheys on saatu pintamittausmenetelmällä.

Pintamittausmenetelmässä erityisesti jakavan tai sitomattoman kantavan kerroksen materiaalien suurista rakeista johtuva pinnan epätasaisuus (mittauslaitteen ja pinnan väliin jäävän tyhjätilan vaihtelu) aiheuttaa enemmän epätarkkuutta kuin suoramittausmenetelmässä. Eroa suora- ja pintamittausmenetelmien tiheystuloksiin voi aiheuttaa myös se, että suoramittausmenetelmällä voidaan mitata yleensä noin 30 cm paksun kerroksen tiheys, mutta pintamittausmenetelmässä tiheyden mittaussyvyys rajoittuu käytännössä noin 10 - 12 cm:iin.

Tiheysmittauksien tarkkuutta voidaan parantaa seuraavin tavoin:

- mittauskohdan tasauksella (tasauslevy, 0/1 mm hiekan tai murskeen lisäys rajoitettuna vain pienelle osalle mittausalasta, korkeintaan 3 mm paksuudeltaan ja läpimitaltaan oleviin koloihin),
- käyttämällä (laitetta kääntäen) esim. 2-3 toistomittauksen sarjan keskiarvoa satunnaishajonnan pienentämiseksi ja



- pyrkimällä siihen, että mitattavan kerroksen kosteuspitoisuus on koko paksuudeltaan riittävän samanlainen (pintaosa ei ole paljon kuivempi tai märempi kuin alaosa).

Jos on syytä epäillä, että Troxler- laitteella mitattu pintakerroksen kosteus poikkeaa merkittävästi koko kerroksen kosteudesta, voidaan tiheyden mittaussyvyyttä vastaavan kerroksen kosteus tarkastaa kuivatuspunnituksilla ja tehdä Troxlerilla mitattuihin kuivairtitiheyksiin tarvittaessa oikean kosteuspitoisuuden mukaiset korjaukset.

### Tasaisuus

Suurpellon katujen jakavilla ja sitomattomilla kantavilla kerroksilla oli vilkas raskas työmaaliikenne, koska alueella oli käynnissä pilaristabilointi. Useimmat tutkimuskohteista olivat kuorma-autojen jälkitiivistämiä. Kuorma-autot tiivistivät rakenteita vain pyörien ajolinjojen kohdilta. Tästä syystä kohteissa oli tien poikkisuunnassa huomattavaa kantavuusvaihtelua ja epätasaisuutta. Ajouria mitattiin oikolaudalla esim. Henttaankaaren sitomattoman kantavan kerroksen kalibrointikoealueen seitsemästä poikkileikkauksesta. Ajourien syvyys vaihteli näissä poikkileikkauksissa välillä 10 – 20 mm ja oli keskimäärin 14 mm (uran pohjan ja uran viereisen kohdan välinen korkeusasemaero), kuva 26.

Merkittävät ajourat ja muut epätasaisuudet tien poikkisuunnassa tekevät jyrän kalibrointimittausten tuloksista epäluotettavia, koska jyrä kantaa vain pinnan korkeimmista kohdista ja jyrän valssin viivakuorma kohdistuu vain näille alueille. Ajourien vaikutus näkyy myös tämän koealueen kantavuustulosten ja jyrämittarin arvojen heikosta korrelaatiosta.



Kuva 26. Ajourien mittaaminen Henttaankaarella. Uransyvyys 10–20 mm.

### **3.3.3 Paikkatiedot työmaan koordinaatistoon**

Jyrän mittaustulosten paikkatieto on sidottu satelliittipaikannuksen käyttämään WGS 84-koordinaatistoon, jossa sijainti ilmoitetaan jatkuvana tietona pituus- ja leveysas-  
teiden avulla. Rakennustyömaalla oli käytössä metripohjainen VVJ-koordinaatisto.

Jotta jyrän mittaustieto voitiin yhdistää työmaan koordinaatistoon, tehtiin työmaalla ensin vertailumittaukset käyttäen satelliittilautasta (Trimble R8) tai robottitaky-

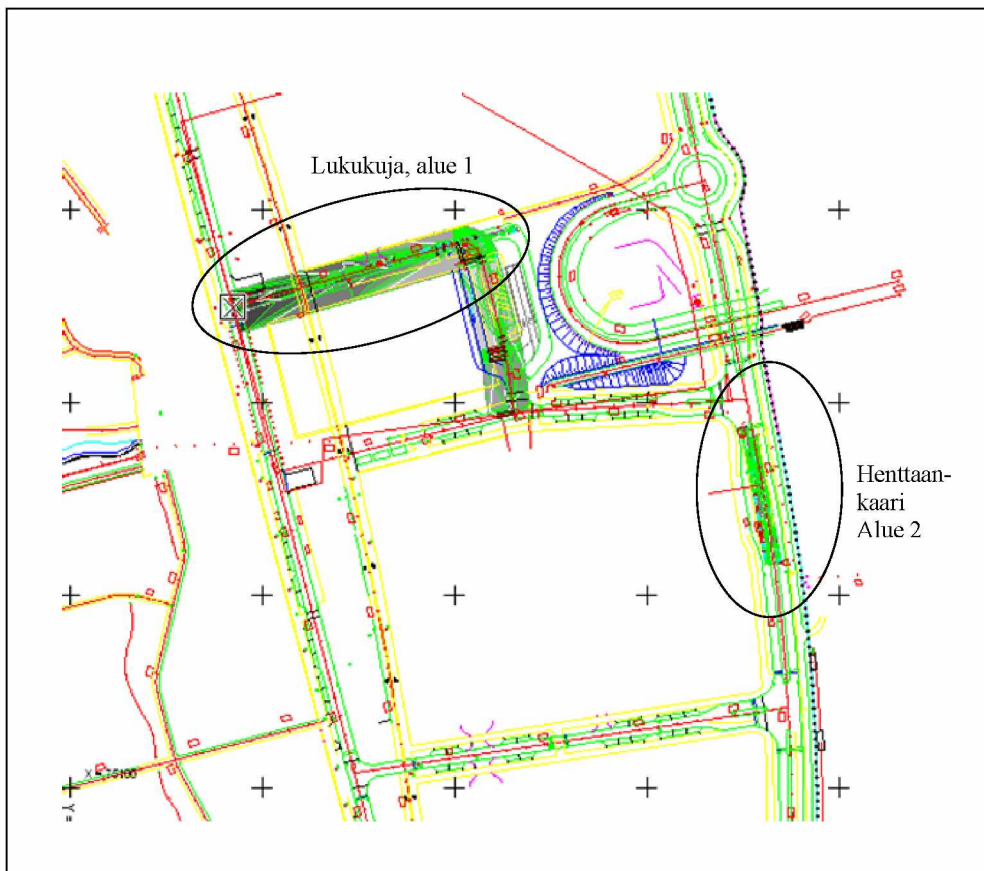
metriä. Jommalla kummalla näistä määritettiin työmaalla vähintään kolmen pisteen sijainti ja tallennettiin mittaustulos mittalaitteen muistiin sekä jyrän WGS84- että työmaan VVJ-koordinaatistossa. Nämä mittaustulokset luettiin jyrän tietokoneelle, joka muunsi sen jälkeen jyrämittarin tulokset VVJ-koordinaateiksi.

Käytännön mittauksissa havaittiin, että jyrän poistuessa edellä mainitun kolmen pisteen määräämän kolmion sisältä, jyrän paikkatiedon muuttaminen työmaan koordinaatistoon ei enää onnistunut. Tästä syystä kannattaa jyrälle valita koordinaatiston muuntamista varten useampia kuin kolme vertailupistettä, joiden rajoittamalle alueelle jyräyskohde jää.

### 3.3.4 Suunnitelmakartta mittaustulosten taustaksi

Suurpellon suunnittelukonsultilta (Ramboll Finland Oy) tilattiin ennen jyräyskokeiden aloitusta Suurpellon rakennuskohteiden suunnitelmakartat sähköisessä muodossa. Kartta-aineisto toimitettiin VTT:lle yleisesti käytössä olevassa DVG-formaatissa, jota käytetään AUTOCAD-suunnitteluohjelmissa.

Caterpillarin jyrän tietokone tunnisti tämän tiedostomuodon ja tiivistyskohteen suunnitelmakartta pystyttiin siirtämään Caterpillarin jyrän mittaustulosten taustakuvaksi ennen mittausten suoritusta. Kuvassa 27 on esitetty työmaan taustakartan ja kaksi tiivistyskoealuetta jyrän tietokoneella.



Kuva 27. Työmaan suunnitelmakartta mittaustulosten taustakuvana ja kaksi tiivistysmittauskoealuetta (Caterpillar-jyrä).

Käytännössä tämä tapahtui siten, että ensin jyrän paikkatietomittausten sijaintikoordinaatit muunnettiin kohdan 3.3.3 mukaisesti VVJ-koordinaateiksi ja sen jälkeen voitiin työmaan suunnitelmakartta viedä jyrän tietokoneelle. Kartta sidottiin työmaan koordinaatistoon kartan koordinaattien ja työmaalta mitattujen pisteiden koordinaattien avulla. Karttaa ja sen yksityiskohtia voidaan suurentaa ja pienentää tietokoneen kuvaruudulla tarpeen mukaan.

### 3.3.5 Mittausten sijainnin sitominen referenssilinjaan

Tiivistyskoealueiden ja mittauskohtien sijainnit voidaan vaihtoehtoisesti sitoa työmaalle tehtävään referenssilinjaan, jos suunnitelmakarttoja ei voida käyttää mittaus-tietojen taustana. Näin meneteltiin Dynapacin jyrän mittaus-tietojen paikallistamisen kanssa.

Tässäkin tapauksessa muunnettiin ensin jyrän koordinaatit edellä kuvatulla tavalla työmaan koordinaateiksi. Sen jälkeen mitattiin maastoon esim. satelliittilautasella referenssilinjan määrittävien pisteiden koordinaatit ja siirrettiin ne jyrän tietokoneelle. Referenssilinjaksi sopi tien- ja kadunrakennuskohteissa esim. ajoradan keskilinja. Mittauspisteiden paikkatieto voitiin ilmoittaa tämän jälkeen kahdella luvulla, joista toinen ilmoitti sijainnin ajoradan pituussuunnassa ja toinen mittauskohdan koh-tisuoran etäisyyden referenssilinjasta (ajoradan keskilinjasta).

### 3.3.6 Jyrien mittaus-tiedon paikantamisen tarkkuus

#### Dynapac

Lukukadun kantavalla kerroksella Dynapacin ensimmäisellä koealueella oli sijainti-määrittystä varten valittu tien keskilinja vertailulinjaksi ja kalibrointipisteiden sijainnit ilmoitettiin jyrän ohjelmassa kahden luvun avulla (paalulukema tien keskilinjaa pitkin ja etäisyys tien keskilinjasta), taulukko 9.

*Taulukko 9. Maaston merkittyjen kalibrointipisteiden sijainnin määrittystarkkuus pin-nan suunnassa. Lukukatu, sitomaton kantava kerros. Dynapac.*

Piste n:o	Etäisyys keskilinjasta	Paalu	Maalimerkkien sijaintiero	CMV- arvo
	Offset	Section		
	m	m	cm	
1	-0,8	124	98	31
2	0,2	125	98	38
4	0,8	124	112	53
5	-0,4	132	113	61
6	0,8	131	98	72
7	0,8	75	72	80
8	0,6	103	70	92
9	0,6	116	65	103
10	0,6	113	150	108
11	-1,6	83	97	117
<b>ka</b>			<b>97,3</b>	<b>76</b>

Jyrän kalibrointimittausajon aikana jyrän PC:n ohjelma valitsi 10 pistettä kalibrointi-pisteiksi ja niiden sijainnit merkittiin kalibrointitulosten yhteyteen. Sen jälkeen jyrä-valssin keskikohta pyrittiin ajamaan sijaintitiedon perusteella vuorotellen kullekin ka-librointipisteelle ja niiden kohdille tehtiin maalimerkintä murskekerroksen pintaan.

Työmaan mittamies merkitsi satelliittilautasen (Trimble R8) avulla toiset maalimerkit murskepintaan jyrän tallentamien kalibrointipisteiden sijaintitietojen perusteella, minkä jälkeen kullekin kalibrointikohdalle oli maalattu kaksi kalibrointipisteen sijaintimerkintää. Maalimerkintöjen välinen etäisyys kuvasi paikannustarkkuutta ja se mitattiin metrimitalla. Tulokset esitetään taulukossa 9.

Lukukadun sitomattomalla kantavalla kerroksella oli jyrän GPS:n ilmoittaman sijaintitiedon ja robottitakymetrin ilmoittaman sijaintitiedon välillä huomattava ero (pinnan suunnassa keskimäärin 97 cm ja vaihteluväli 65...150 cm).

Jyrän ajaminen kalibrointipisteelle siten, että valssin keskikohta osuisi tarkoin ennalta valittujen koordinaattipisteiden kohdille, osoittautui kohtalaisen vaikeaksi. Tästä syystä jatkossa meneteltiin siten, että kalibrointimittausajon jälkeen valittiin jyrän näytöltä sopivien kalibrointipisteiden sijainnit likimäärin, ajettiin jyrä kullekin pisteelle, merkittiin vasta sen jälkeen valssin keskikohdan sijainti ensin jyrän PC:lle ja sen jälkeen maalimerkeillä murskekerroksen pintaan. Tällöin vertailumittaukset kalibrointilaitteilla voitiin tehdä tarkoin jyrän valssin keskipisteen kohdalla riippumatta GPS-paikannuksen tarkkuudesta.

Henttaan puistokadun jakavalla kerroksella oli toinen koealue, jolla selvitettiin paikannustarkkuutta. Jyrän GPS-laite määrittä kalibrointipisteiden koordinaatit työmaan VVJ-koordinaatistossa. Satelliittilautasen ja jyrän GPS:n avulla määritettyjen kalibrointipisteiden sijaintiero (etäisyys pinnan suunnassa suorakulmaisessa xy-koordinaatistossa) laskettiin kaavalla (1). Taulukossa 10 on esitetty tämän paikannusmittauksen tulokset.

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

jossa

- piste  $(x_1, y_1)$  = jyrän GPS:n mittaama kalibrointipisteen sijainti,
- piste  $(x_2, y_2)$  = satelliittilautasen mittaama sijainti samalle kalibrointipisteelle
- $d$  = koordinaattien  $(x_1, y_1)$  ja  $(x_2, y_2)$  välinen etäisyys pinnan suunnassa.

*Taulukko 10. Maaston merkittyjen kalibrointipisteiden sijainnin määrittystarkkuus pinnan suunnassa. Henttaan puistokatu, jakava kerros. Dynapac.*

piste n:o	Henttaan puistokatu, jakavan kerroksen yläpinta. Jyrä: Dynapac				Koordinaattipist. sijaintiero
	Sijainti jyrän mukaan		Sijainti satelliittilautasen mukaan		Pinnan suunta
	pohjoiseen	itään	pohjoiseen	itään	
	m	m	m	m	cm
1	75421,900	41369,400	75421,904	41368,713	70
2	75415,500	41371,200	75415,471	41370,521	70
3	75400,200	41374,500	75400,176	41374,449	7
4	75405,900	41369,100	75405,188	41369,095	70
5	75428,400	41364,000	75428,673	41363,348	70
6	75407,200	41370,600	75407,071	41370,507	20
7	75411,500	41367,700	75411,832	41367,344	50
ka					50



Taulukko 12. Jyrän ja satelliittilautasen mittaamien kalibrointipisteiden sijaintiero (Henttaankaari, kantavan kerroksen yläpinta). Caterpillar).

Kohde: Henttaankaari, kantavan kerroksen yläpinta. Jyrä: Caterpillar							Sijaintiero	
piste	Sijainti jyrän mukaan			Sijainti satelliittilautasen mukaan			Pinnan suunta	Pystysuunta
	pohjoiseen	itään	korkeus	pohjoiseen	itään	korkeus		
	m	m	m	m	m	m		
Pt1	75283,000	41651,270	6,130	75283,007	41651,238	6,062	3,3	6,8
Pt2	75272,220	41655,210	6,090	75272,190	41655,253	6,062	5,2	2,8
Pt3	75263,510	41654,600	5,970	75263,469	41654,597	5,955	4,1	1,5
Pt4	75244,710	41657,970	5,890	75244,691	41657,973	5,852	1,9	3,8
Pt5	75228,090	41663,030	5,870	75228,063	41663,103	5,884	7,8	-1,4
Pt6	75228,030	41667,930	5,820	75228,019	41667,966	5,761	3,8	5,9
Pt7	75239,470	41665,840	5,860	75239,499	41665,832	5,784	3,0	7,6
Pt8	75243,450	41665,250	5,890	75243,503	41665,244	5,865	5,3	2,5
Pt9	75253,940	41661,040	5,990	75253,930	41660,957	5,977	8,4	1,3
Pt10	75276,460	41657,730	6,120	75276,589	41657,667	6,096	14,4	2,4
ka							5.7	3.3

### 3.3.7 Kalibrointimittaustuloksia

#### Caterpillar

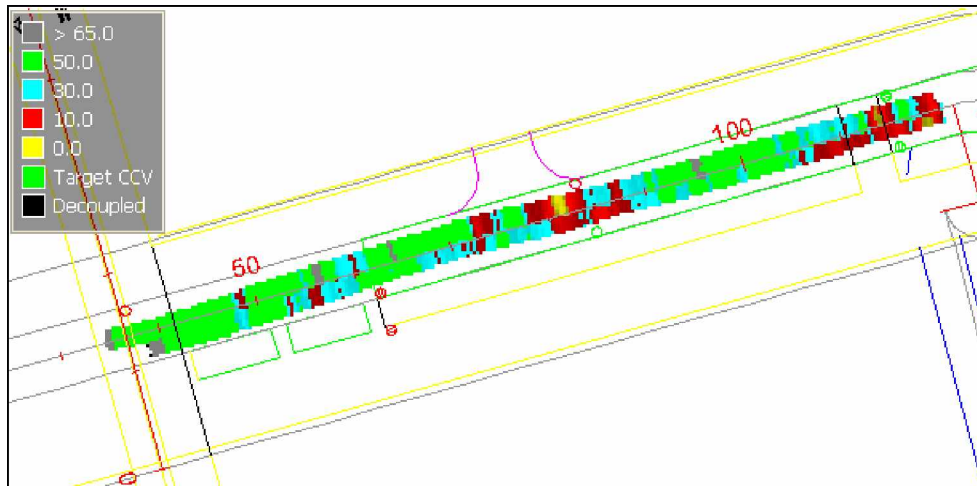
Caterpillar ei käytä tehtaan kouluttajan (Durand) mukaan kalibroinnin yhteydessä korrelaatiokertoimen laskemista jyrän mittaustuloksen ja vertailulaitteen tuloksista. Tällöin jyrän ilmoittamaa suhteellista CCV-arvoa (Caterpillar Compaction Value) ei voida muuntaa kantavuudeksi. Tehtaan edustaja valitsi kokemuseräisesti tiivistystavoitteeksi jakavan kerroksen tiivistämiselle CCV = 50 ja sitomattomalle kantavalle kerrokselle CCV = 48. Kalibroinnissa käytettiin koko ajan frekvenssiä 30 Hz. Amplitudi oli säädettävä välillä 0,9–1,8 mm.

Kuvassa 28 on esitetty Caterpillar-jyrän ilmoittamat suhteelliset tiiviysarvot Lukukujan kohteen jakavasta kerroksesta. Jakava kerros oli levitetty etukäteen ja sen päällä oli kulkenut raskas kuorma-autoliikenne jyräyksen ja kalibroinnin välisenä aikana. Vihreällä alueella kokemuseräisesti valittu CCV-tavoite saavutettiin.

Taulukko 13. Lukukujan jakavan ja sitomattoman kantavan kerroksen tiivistystyön asetukset ja tavoite (Caterpillar).

	Jakava kerros	Kantava kerros
amplitudi	matala	matala
mittaussuunta	eteenpäin ajettaessa	eteenpäin ajettaessa
ajonopeus	noin 2,5 km/h	(1,5 < Ajonopeus < 3.3) km/h
ylityskerrat	1	1
tiivistystavoite	CCV = 50	CCV = 48



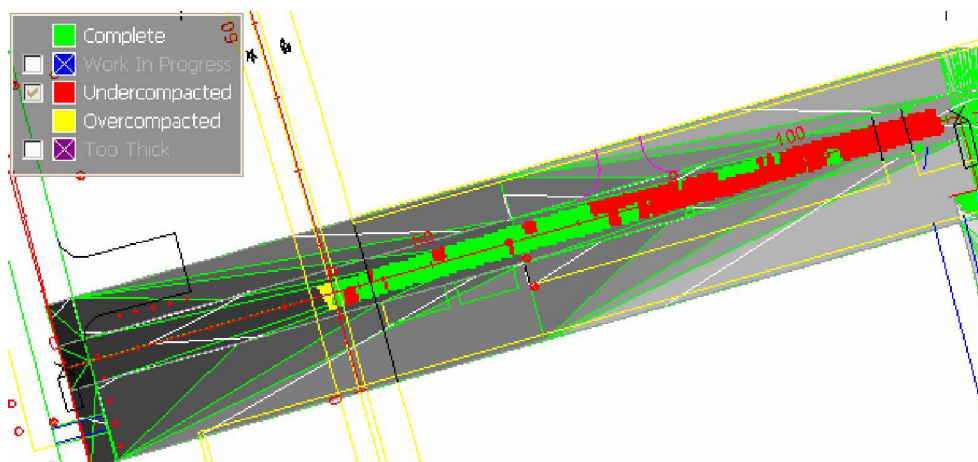


Kuva 28. Caterpillar-jyrän tiivistyksen tarkkailulaitteen tulokset (CCV-arvot) Suurpellon Lukukujan kohteen jakavalla kerroksella (tiivistystavoite CCV = 50).

Lukukujan jakavan kerroksen mittausten jälkeen levitettiin välittömästi kantavan kerroksen murske. Mursketta tuli sekä urakoitsijan omalta murskaamolta että myyjän varastosta. Suoraan murskaamolta tullut murske oli erittäin kuivaa. Kuvassa 29 on esitetty Lukukujan kohteessa mitatut kantavan kerroksen CCV-arvot. Kantavalla kerroksella oli tiivistystavoite CCV = 48.

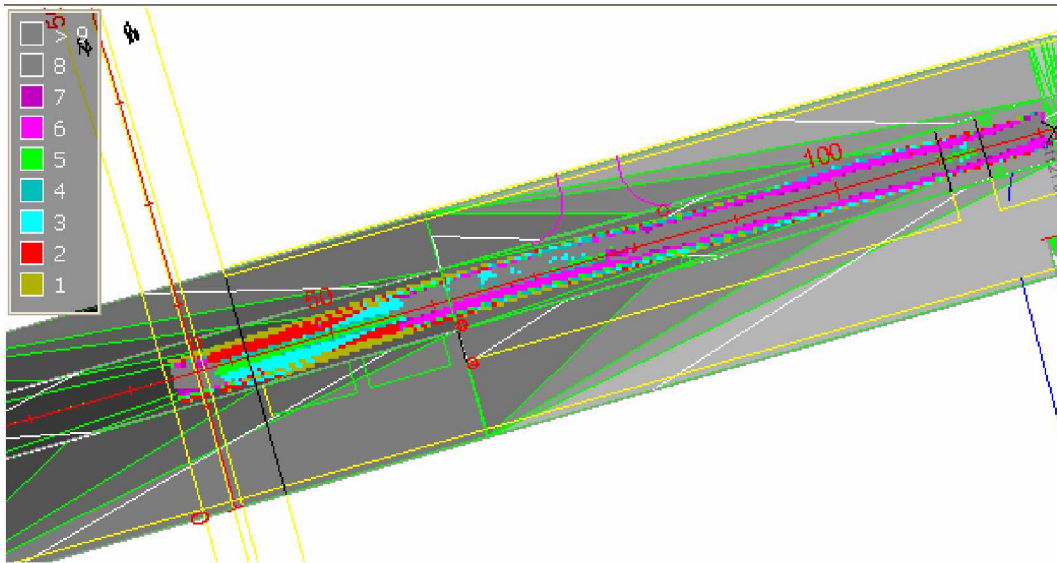
Yleensä ylemmälle kerrokselle valitaan korkeampi tiivistystavoite kuin alemmalle kerrokselle. Tässä kohteessa oli kuitenkin tiivistystavassa olennainen ero eri kerrosten välillä, koska liikenne ei ehtinyt jälkitiivistää sitomatonta kantavaa kerrosta.

Kuvassa 30 on esitetty jyrän tallentama tieto jyrän ylityskertojen lukumäärästä sitomattoman kantavan kerroksen jyräyksen aikana (Caterpillar, Suurpelto, Lukukuja). Ylityskertamäärät on eroteltu värien avulla. Esim. kadun keskialueella on yli 9 ylityskertaa ja reunoilla vähemmän. Kohteen kapeuden vuoksi jyräyskaistoja oli vai kaksi.



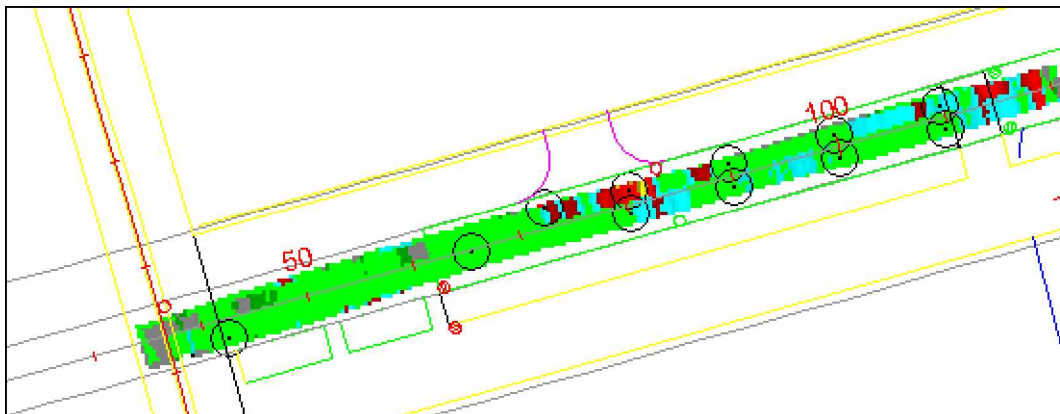
Kuva 29. Caterpillar-jyrän tiivistyksen tarkkailulaitteen tulokset (CCV-arvot) Lukukuja, sitomaton kantava kerros (tiivistystavoite CCV = 48).





Kuva 30. Caterpillar-jyrän ylityskertojen lukumäärä. Lukukuja, kantava kerros.

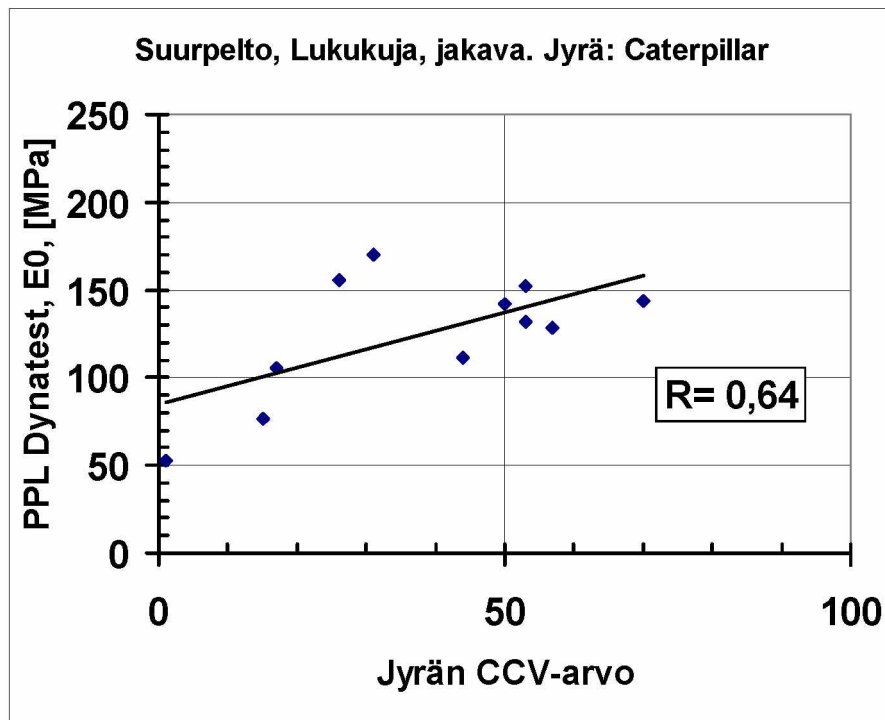
Kuvassa 31 on esitetty ympyröityinä pudotuspainolaitteen kantavuudenmittauskohdat, jotka tallennettiin jyrän tietokoneelle, kun kalibrointimittauspisteet valittiin jyrän tiedostosta.



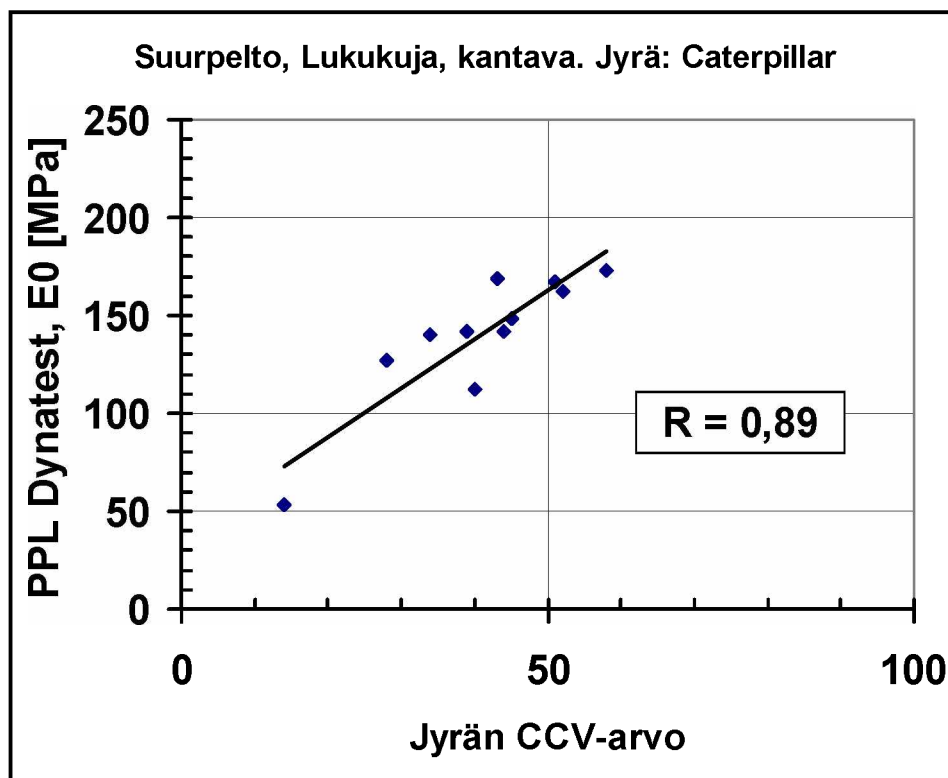
Kuva 31. Kalibrointipisteiden sijainnit merkitty ympyröillä jyrän tiedostoon työmaan karttapohjalle (Lukukuja, kantava kerros, Caterpillar).

Caterpillarin jyrän tiivysmittaustulosten ja pudotuspainolaitteen kantavuusarvojen välinen korrelaatiokerroin oli 0,64 (Lukukuja, jakava kerros). Se ei täyttänyt useissa ohjeissa olevaa vaatimusta (korrelaatiokerroin  $\geq 0,7$ ), kuva 32.

Saman kohteen kantavalla kerroksella jyrän mittarin ja pudotuspainolaitteen tulosten välinen korrelaatiokerroin oli 0,89 eli olennaisesti parempi, kuva 33.



Kuva 32. Caterpillar-jyrän tiiviysmittaustuloksen riippuvuus pudotuspainolaitteen (PPL) kantavuusarvosta (Lukukuja, jakava kerros).



Kuva 33. Caterpillar-jyrän tiiviysmittaustuloksen riippuvuus pudotuspainolaitteen kantavuusarvosta (Lukukuja, sitomaton kantava kerros).

Suurpellon kadunrakennuskohteiden kantavuusvaatimukset olivat:

- sitomaton kantava kerros: kantavuus 155 MPa
- jakava kerros: kantavuus 115 MPa.

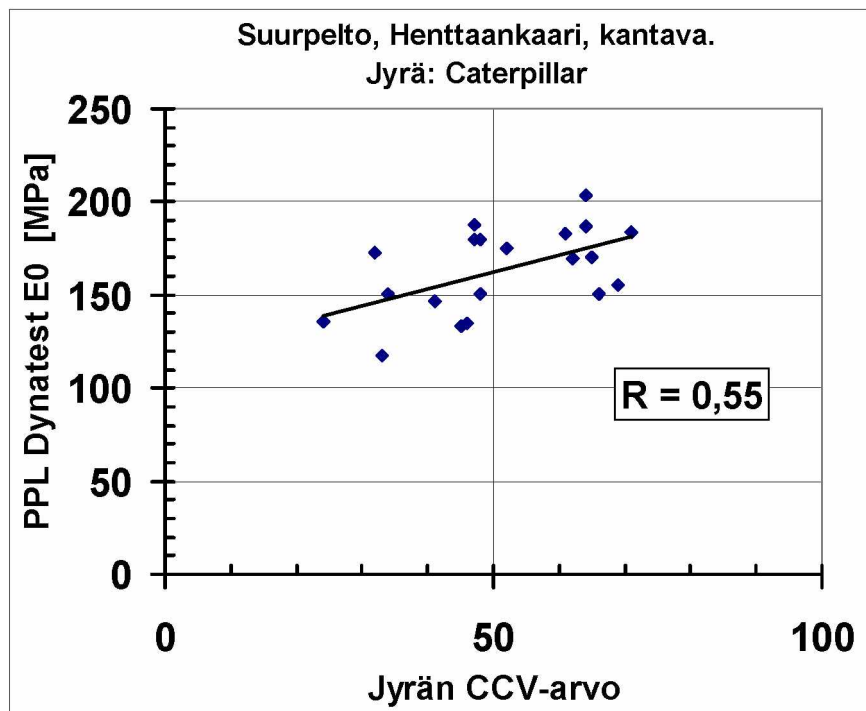
Urakan kantavuusvaatimukset eivät toteutuneet useiden kalibrointimittauspisteiden kohdalla, kuvat 32 ja 33.

Caterpillarin jyrän toinen kalibrointikoealue sijaitsi Henttaankaarella. Kuvassa 34 esitetään kohteesta mitatut jyrämittarin mukaiset kantavuustiedot. Jyräkouluttaja valitsi kokemusperäisesti tavoitearvoksi CCV 50. Kuvassa vihreät ja harmaat alueet täyttivät vaatimuksen  $CCV \geq 50$ . Korrelaatio vertailulaitteen kanssa oli heikko eikä suuri osa referenssipisteistä pudotuspainolaitteella (Dynatest) mitatuista kantavuuksista täyttänyt urakan kantavuusvaatimusta, kuva 35.

Raskas kuorma-autoliikenne oli tiivistänyt koealuetta ajolinjojen kohdilta ja painanut pintaan syvät urat.



Kuva 34. Caterpillar-jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen tulokset (CCV-arvot). Henttaankaari, sitomaton kantava kerros (tiivistystavoite CCV = 50).



Kuva 35. Caterpillar-jyrän tiivistymittauksen riippuvuus pudotuspainolaitteen kantavuusarvosta (Henttaankaari, sitomaton kantava kerros).

#### Hamm

Hamm-jyrällä tehtiin vuonna 2009 tiivistyskokeita yhtenä vain yhtenä päivänä, koska jyrä oli mukana jo edellisen vuoden tiivistystutkimuksissa. Tiivistyskokeiden suorituspäivänä oli muutamia asteita pakkasta ja edellisenä yönä oli satanut ohut lumikerros. Lukukujalta poistettiin lumikerros tiehöylän emäterällä ennen tiivistyskokeita. Kalibrointimittaukset suoritettiin jyränvalmistajan edustajan Jarek Lakomskin ohjeiden mukaan Lukukujan ajoradan sitomattomalla kantavalla kerroksella ja sen vieressä olevalla kevyen liikenteen väylällä.

Lukukujan kantava kerros oli tiivistetty aiemmin ja tämän kerroksen päältä tehtiin jyrällä ainoastaan kalibrointimittausajo (yhteen ajosuuntaan). Koealueelta valittiin 6 kalibrointipistettä, joista mitattiin kantavuus VTT:n Dynatest- pudotuspainolaitteella.

Kultakin kalibrointipisteeltä mitattiin kantavuus kolmesta kohdasta jyrän valssin alta ”viivakuormalinjalta”. Kolmen mittauksen avulla pyrittiin selvittämään, onko kalibrointialueella merkittäviä sivusuuntaisia kantavuuseroja, jotka voisivat aiheutua koealueen kapeudesta tai kuorma-autoliikenteen aiheuttamista tiiviyseroista. Jyrän mittari antoi vain yhden mittausarvon koko valssin leveydelle, joten yhtä jyrämittarin arvoa verrattiin kolmeen pudotuspainolaitteen mittaustulokseen. Tulokset on esitetty kuvassa 37. Niiden perusteella sivusuuntaiset kantavuuserot eivät olleet merkittäviä koealueella.

Jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen mittaama Lukukujan kantavan kerroksen kantavuutta kuvaava arvo on esitetty kuvan 36 yläosassa ja sen alapuolella on esitetty jyrän mittaustulos Lukukujan viereiseltä kevyen liikenteen väylältä.



### Dynapac

Dynapac- jyrällä tehtiin kalibrointimittaukset kahdessa kohteessa. Henttaan Puistokadulla tiivistettiin jakavaa kerrosta ja mitattiin Dynatest- pudotuspainolaitteella vertailuarvot. Vaatimusraja 111 MPa vastaa CMV-arvoa 39. Tulokset on esitetty VVJ-koordinaatistossa kuvassa 38.

Kun kuvan alareunassa olevaan taulukon vasempaan sarakkeeseen kirjoitettiin työmaan kantavuusvaatimus 111 MPa, taulukon oikean reunaan sarakkeeseen ilmestyi siitä vastaava CMV- arvo. Kuvan vasemmassa ylänurkassa on jyräskuvan värien selitys CMV-arvoina. Näitä CMV-arvoja vastaavat pudotuspainolaitteen kantavuusarvot voidaan laskea kuvassa 38 esitetystä regressiosuoran yhtälöstä johdetulla kaavalla 2:

$$E_{vd} = 2,0004 * CMV + 32,686 \quad (2)$$

On huomattava, että kaava 2 päti vain tämän kalibroinnin tuloksille, koska kaava perustui kuvan 38 regressiosuoraan.

Dynapac jyrän tiivistystyötä voidaan ohjata jyrämittarin CMV- arvojen avulla. Kun kalibrointimittaukset tehdään vertailulaitteen kanssa, saadaan regressiosuoran yhtälö, jonka avulla voidaan laskea, mitä jyrän ilmoittama CMV- arvo merkitsee kantavuusmittausten mukaisissa yksiköissä.

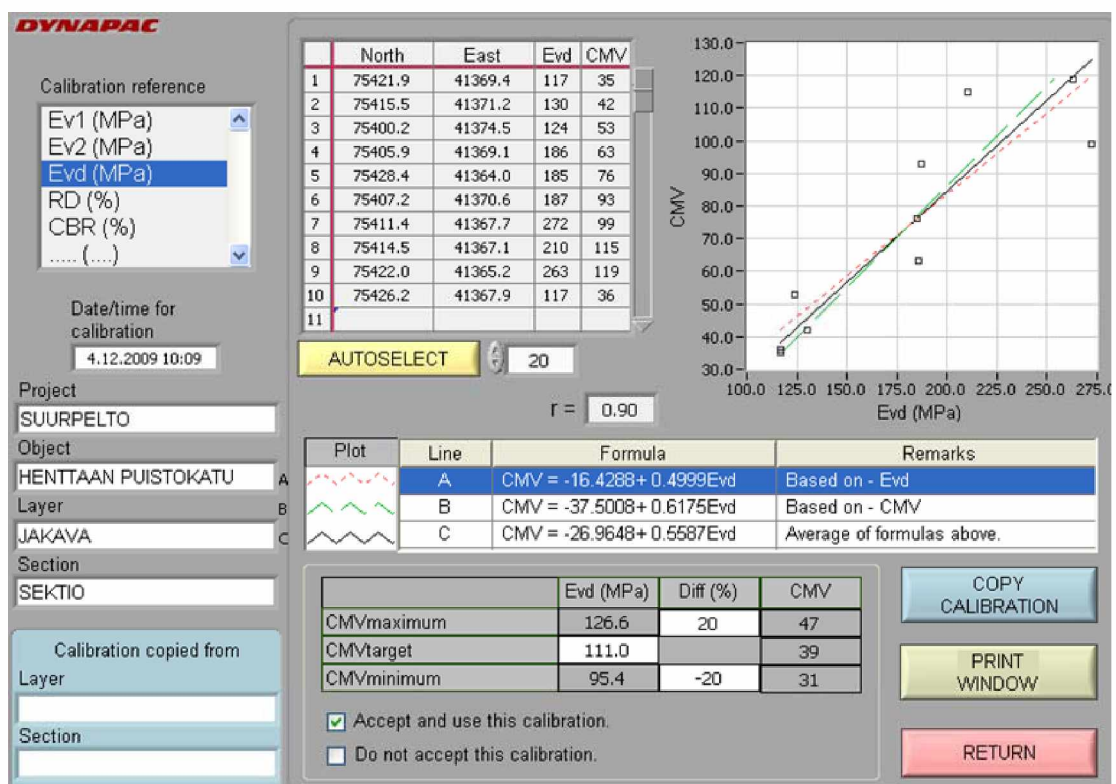
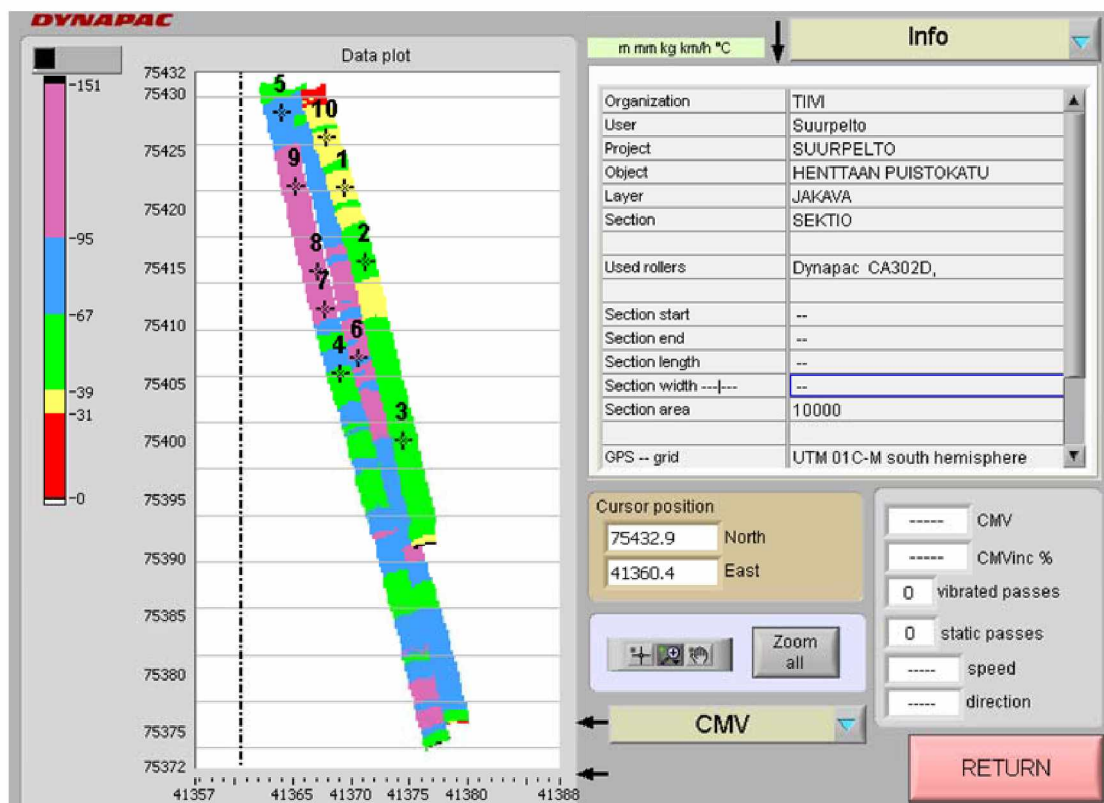
Dynapacin jyrän Henttaan puistokadun kalibrointipisteiden CMV-mittaustuloksia verrattiin samoissa pisteissä samana päivänä tehtyihin pudotuspainolaitteen kantavuusarvoihin. Jyrän mittaustuloksilla oli kalibrointipisteissä hyvä korrelaatio pudotuspainolaitemittausten tulosten kanssa (korrelaatiokerroin 0,90). Sen sijaan jyrän mittaustuloksilla ei ollut lainkaan korrelaatiota kalibrointipisteissä tehtyjen Troxler-pintamittausten kanssa, kuva 39.

Koska näillä mittaustavoilla saatiin keskenään hyvin korreloivat kantavuutta kuvaavat tulokset, soveltuu pudotuspainolaite käytettäväksi myös menetelmässä, jossa kerrosta tiivistetään joka kohdassa niin kauan, että CMV- arvo ei enää parane ja tarkastetaan sen jälkeen pudotuspainolaitteella alhaisimman CMV-arvon mukaisista kohdista, onko niissä vaatimusten mukainen tiiviyssuhde ( $E_2/E_1$ ).

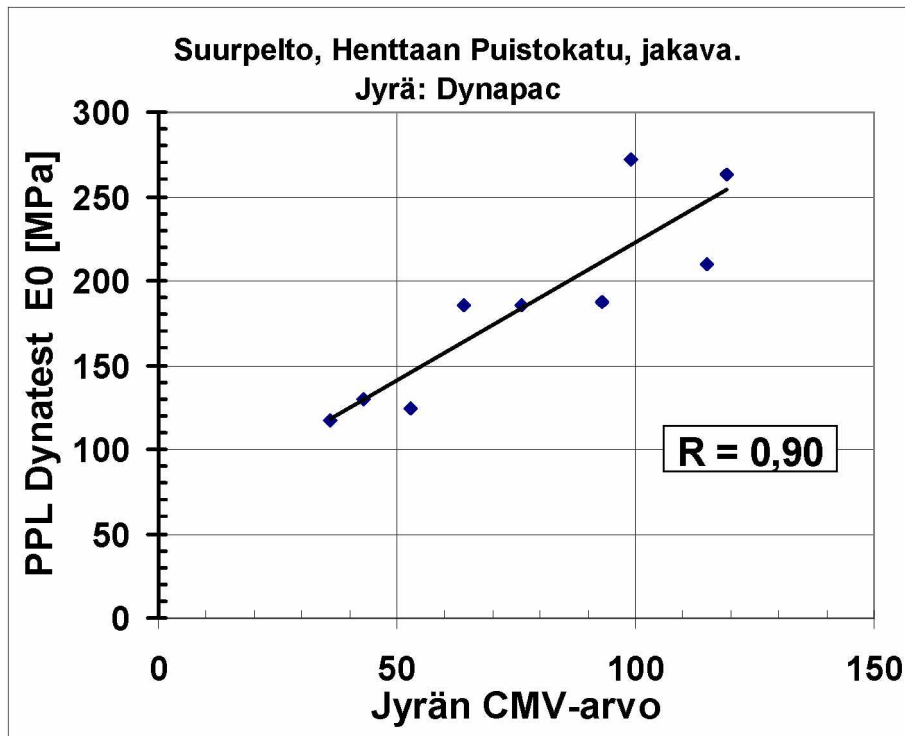
Kuvassa 41 on esitetty Dynapac-jyrän mittaustulokset Lukukadun sitomattomasta kantavasta kerroksesta. Kuvasta 38 poiketen on kuvassa 41 esitetty mittaustulosten sijaintitieto referenssilinjaan sidottuna. Kunkin pisteen sijainti ilmoitettiin tällöin referenssilinjaa pitkin mitatun etäisyyden ja referenssilinjaa vastaan kohtisuoraan mitatun etäisyyden avulla. Dynatest- pudotuspainolaitteella mitattua tavoitekantavuutta 155 vastaava jyrämittarin CMV-arvo on 52.

Lukukadun kantavan kerroksen kalibrointipisteissä oli Dynapacin jyrämittarin tulosten ja pudotuspainolaitteiden tulosten välinen korrelaatiokerroin  $R = 0,84$ , kuvat 40 ja 41. Pudotuspainolaitteella tehtyjen vertailumittausten perusteella jyrämittarin CMV-arvot pystyttiin siten muuntamaan kantavuusmittausten mukaisiksi mittayksiköiksi (MPa).

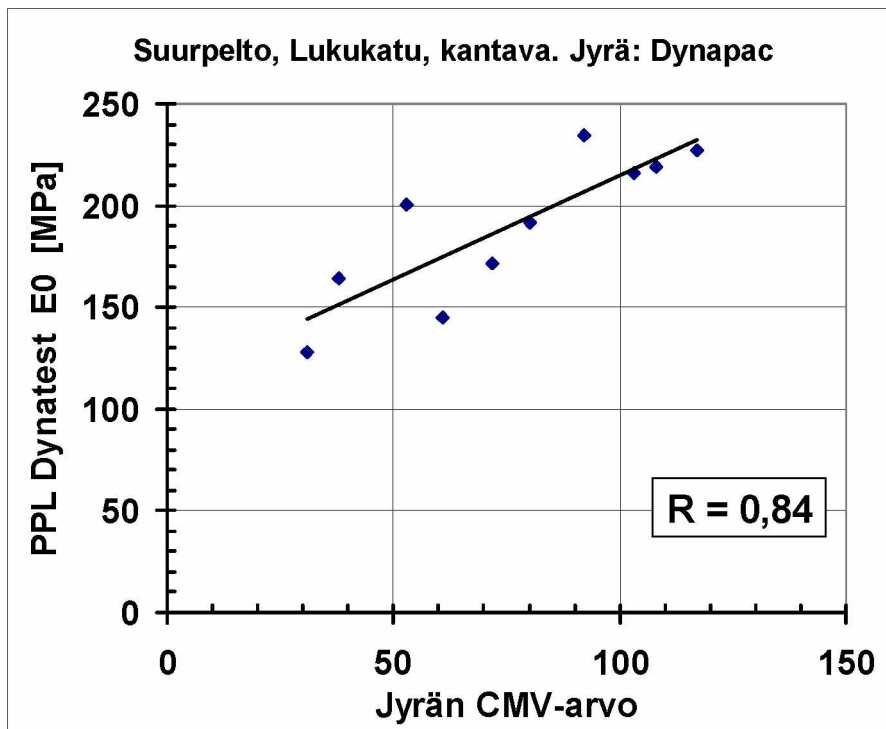




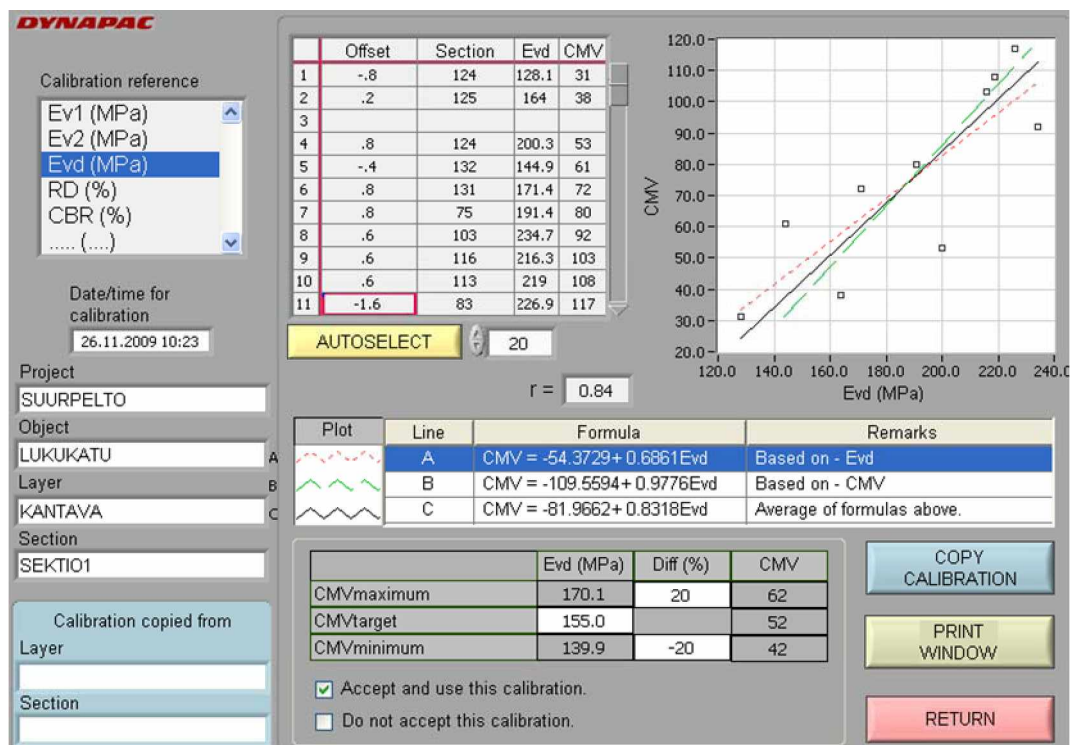
Kuva 38. Dynapac-jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen tulokset (CMV-arvot) Suurpellon Henttaan Puistokadun jakavalla kerroksella.



Kuva 39. Dynapac-jyrän CMV-mittaustuloksen riippuvuus pudotuspainolaitteen kantavuusarvosta (Henttaan Puistokatu, jakava kerros).



Kuva 40. Pudotuspainolaitteen kantavuusarvon riippuvuus Dynapac-jyrän CMV-mittaustuloksesta (Lukukatu, sitomaton kantava kerros).



Kuva 41.

Dynapac-jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen tulokset (CMV-arvot) Suurpellon Lukukadun sitomattomalla kantavalla kerroksella.

### 3.3.8 Tiiviyssaste ja -suhde kalibroinnin vertailuarvoina

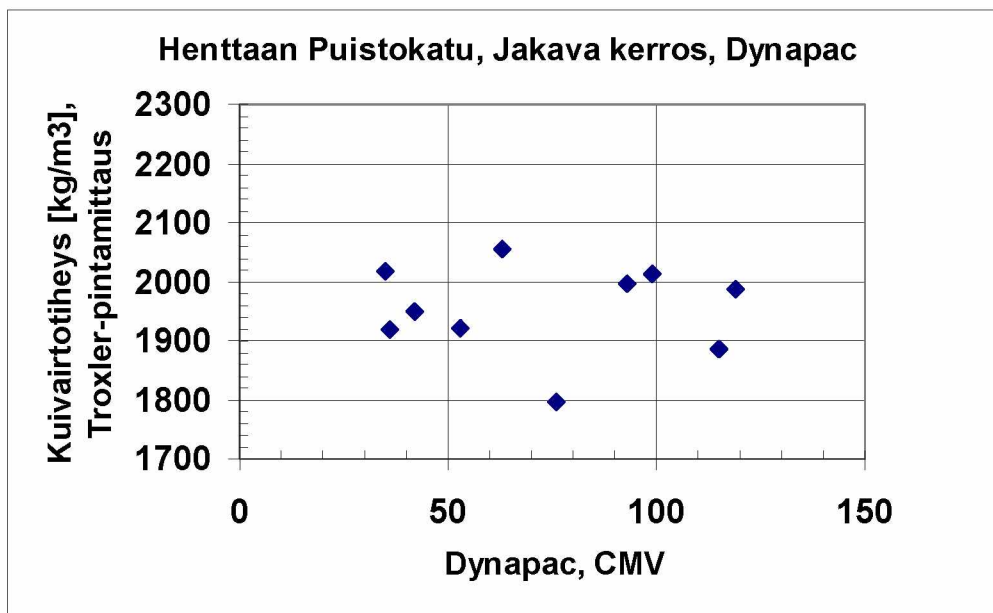
Sitomattomien materiaalien tiivistystyön vaatimustenmukaisuus määritetään Infra-RYL:ssä tiiviyssuhteen tai tiiviyssasteen perusteella. Tiiviyssaste on tiivistetyn kerroksen radiometrisellä mittausrakenteella mitatun kuivairtitiheyden ja (esim. Proctor-kokeen) maksimikuivairtitiheyden suhde prosentteina. Tiiviyssuhde ( $E_2/E_1$ ) on levykuormituskokeen tai pudotuspainolaitteen toisesta kuormituksesta lasketun kantavuusarvon suhde ensimmäisestä kuormituksesta laskettuun kantavuusarvoon.

Jos jyrämittarin tulokset voitaisiin muuntaa laatuvaatimusten mukaisiin yksiköihin, se yksinkertaistaisi jyrämittarin tulosten tulkintaa.

#### Tiheys ja tiiviyssaste

Edellä on kuvattu Dynapacin jyrällä Henttaan Puistokadun jakavalla kerroksella ja Lukukadun kantavalla kerroksella tehdyt kenttäkalibroinnit käyttäen vertailumenetelmänä Dynatest pudotuspainolaitetta, jolla todettiin molemmissa kohteissa hyvä korrelaatio jyrämittarin tuloksiin.

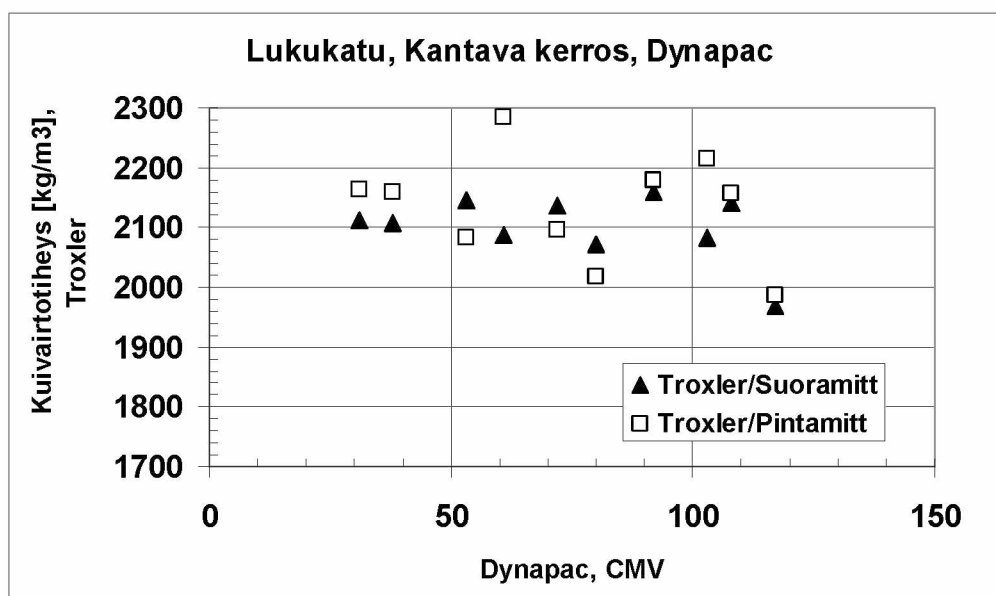
Kalibrointimittausten yhteydessä tehtiin kalibrointipisteistä mittauksia myös radiometrisellä mittausrakenteella Troxler 3411-B. Troxler-mittaustulos on kolmen havainnon keskiarvo samasta kohdasta (mittausten välillä laitteen suuntaa käännettiin 120°). Troxlerilla tehtiin vain pintamittauksia, koska laitteen suoramittauksissa käytettävälle mittaustangolle ei pystytty lyömään tarvittavaa reikää tiivistettyyn kerrokseen suuren maksimiraekoon vuoksi. Kuvassa 42 on verrattu jyrämittarin CMV-tuloksia ja Troxler-pintamittaustuloksiin. Tulosten välillä ei ollut korrelaatiota, joten Troxler-pintamittaustulosten avulla ei voitu muuntaa CMV-mittaustuloksia Troxlerin tulosten mukaisiksi mittayksiköiksi.



Kuva 42. Troxler- pintamittauksen kuivairtitiheyden riippuvuus Dynapac-jyrän CMV-arvosta (Henttaan Puistokatu, jakava kerros).

Dynapacin jyrän Lukukadun kantavan kerroksen CMV-mittausten kalibrointipisteistä tehtiin tiheysmittaukset Troxler-laitteen suoramittaus- ja pintamittausmenetelmillä. Kummallakaan Troxler-menetelmällä saadut mittaustulokset eivät korreloineet CMV-

mittaustulosten kanssa, joten niitä ei voitu käyttää Dynapacin jyrän tiiviyttä kuvaavien arvojen kalibrointiin, kuva 43.



Kuva 43. Troxler suora- ja pintamittauksen kuivairtitiheyden riippuvuus Dynapac-jyrän CMV-arvosta (Lukukatu, sitomaton kantava kerros).

Jos tiivistyksen laatu mitataan työmaalla rakenteen tiiviyssasteen perusteella, täytyy kerrosmateriaalin maksimikuivairtitiheys määrittää etukäteen (esim. parannetulla Proctor-kokeella) ja rakenteesta tulee mitata kuivairtitiheyksiä esim. radiometrisellä säteilymittauslaitteella. Proctor-koetta ei tehdä erikseen jokaiselta kalibrointipisteeltä otetuille murskenäytteille, vaan yhden Proctor-kokeen tulos edustaa koko kalibrointialueen yksittäisen kerroksen materiaaleja. Parannetun Proctor-kokeen maksimikuivairtitiheys oli siksi vakio koko kalibrointialueen kerrosmateriaalille. Lukukujan kantavan kerroksen murskeen maksimikuivairtitiheys oli 2191 kg/m³ Proctor-kokeen perusteella.

Jyrän tiivysmittausten kenttäkalibroinnissa koko Lukukadun kalibrointikoealuetta vastasi siten yksi Proctor-kokeen mukainen maksimikuivairtitiheys, mutta jokaista saman alueen kalibrointipistettä vastasi rakenteesta pistekohtaisesti määritetty kuivairtitiheys ja jyrämittarin mittaama tiivistystyön laatua kuvaava CMV-arvo.

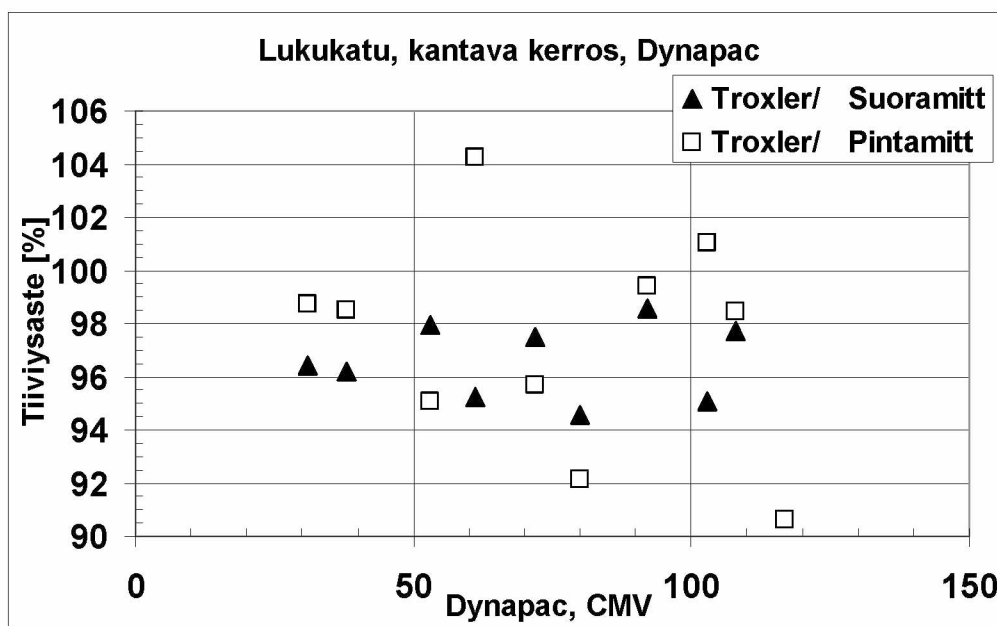
Kuvassa 44 on esitetty tiiviyssasteen riippuvuus jyrämittarin CMV-arvoista. Tiiviyssasteet olivat hyviä ja täyttivät InfraRYL:n yksittäisten näytteiden vaatimukset.

Tiiviyssasteen vertaaminen jyrämittarin tuloksiin ei kuitenkaan tuo mitään lisäarvoa jyrän mittaustulosten kalibroinnin kannalta edelliseen kuvaan 43 verrattuna. Tiiviyssasteen ja jyrän CMV-arvon riippuvuus kuvassa 43 on luonnollisesti identtinen kuvan 44 mukaisen irtotiheyden ja jyrän CMV-arvon riippuvuuden kanssa, koska koko kalibrointialueella oli tiiviyssasteen laskemisessa käytetty samaa Proctor-kokeen kuivairtitiheyttä. Tästä syystä tiiviyssastetta laskettaessa yksittäiset Troxler-mittarin mittaustulokset käytännössä jaettiin vakiolla.

Kummassakaan kuvassa mittaustulosten välillä ei ole korrelaatiota. Tiiviyssaste tai pelkät kalibrointipisteiden tiheysmittaustulokset eivät soveltuneet jyrän CMV-



mittaustulosten kenttäkalibrointiin, koska nämä vertailumittaustulokset eivät korreloineet CMV-arvojen kanssa.



Kuva 44. Tiivysasteen riippuvuus Dynapac-jyrän CMV-arvosta (Irtotiheysmäärittäykset työmaalla Troxler suora- tai pintamittauksilla, vertailutiheys parannetulla Proctor-menetelmällä, Lukukatu, sitomaton kantava kerros).

Tässä tapauksessa oli luonnollista, että jyrän tiiviyttä kuvaavat CMV- arvot eivät korreloineet tiivysasteen tai Troxlerin tiheysmittaustulosten kanssa, koska menetelmät mittasivat eri asioita tai ominaisuuksia:

- Tulosta selitti mm. menetelmien mittaussyvyyksien ero. Tiivistykseen käytetyn noin 12 t täryjyrän mittaussyvyys oli noin 0,8-1,5 m. Radiometrisen tiheysmittarin (esim. Troxler 3411-B) mittaussyvyys oli noin 0,1-0,3 m. Mittaustuloksiin vaikuttavat vain mittaussyvyydellä olevat kerrokset ja materiaalit.
- Lisäksi menetelmät mittaavat erilaisia fysikaalisia suureita. Jyrän mittalaite mittaa verrattain paksun kerroksellisen rakenteen suhteellista jäykkyyttä, kun taas radiometrinen mittari mittaa rakenteen yläosan (0,1-0,3 m) tiheyttä.
- Menetelmien vaikutusalueen leveys oli erilainen. Jyrä mittasi koko valssin leveydeltä, Troxler mittasi pistekohtaisesti. Lisäksi maksimikuivairtoteiheyys oli tiivysastelaskelmissa vakio koko kalibrointialueella.
- Jyrän mittaustulosten ja niiden kanssa yhteensopivan vertailumenetelmän (kantavuusmittaukset) avulla saatiin kokonaiskuva koko tiivistettävän alueen kantavuudesta.
- Pistekohtaiset mittausrakenteet yksinään osoittavat tiivistystyön laadun vain pistekohtaisesti, mutta kun tiivistystyötä jatketaan siihen asti, että jyrämittarin arvot eivät enää kasva, voidaan huonoimmat jyrämittarin arvot antaneista kohdista mitattujen tiivistysasteiden perusteella varmistaa, että tiivistymisen loppuminen ei johtunut esim. sopimattomasta jyrästä, vääristä jyräysparametreista tai liikaa optimista poikkeavasta kosteuspitoisuudesta.
- Kuvasta 44 voidaan todeta, että huonoimpia jyrämittarin CMV- arvoja vastaavat tiivysasteet ovat reilusti vaatimusta (90 %) parempia. Myös kuvan 44 tiivysasteiden keskiarvo on vaatimusta (95%) parempi. Tiivistysasteen mittausta

rajoittavana tekijänä Suomessa on jakavassa ja kantavassa kerroksessa käytettyjen kiviainesten suuri raekoko. Siksi Suomessa on käytetty tiivistyksen laadun mittaukseen myös tiivistyssuhdetta  $E_2/E_1$ , joka pystytään mittaamaan jonkin verran karkearakeisemmista kiviaineksista tehdyistä kerroksista ja samalla saadaan kantavuustieto.

### Tiivistyssuhde

Jyrämittarin mittaustulosten kalibrointi työmaaolosuhteiden mukaan edellyttää vertailuarvon määrittämistä muulla laitteella esim. raskaalla pudotuspainolaitteella tai levykuormituskokeella. Tiivistyssuhde  $E_2/E_1$  ei soveltunut jyrän tiivistyksen tarkkailulaitteen tuloksen vertailuarvoksi, koska se ei korreloinut jyrämittarin tulosten kanssa. Sen sijaan kantavuusarvolla on merkittävästi parempi korrelaatio jyrän mittaustulosten kanssa.

Suunnitelmissa annetaan tiivistettäville kerroksille tavoitekantavuudet. Tavoitekantavuudet on laskettu olettaen tietty pohjamaan kantavuus ja suunnitelman mukaiset sekä laatuvaatimukset täyttävät rakennekerrokset. Jos mitattu kantavuus on pienempi kuin tavoitekantavuus, on selvítettävä poikkeaman syy ja päätettävä tarvittaessa korjaustoimenpiteistä.

Taulukossa 14 on esitetty tutkimusaineiston kalibrointikoealueilla mitattujen kantavuusarvojen ja tiivistyssuhteiden minimi, maksimi ja keskiarvot. Tiivistyssuhteet täyttivät kaikilla koealueilla InfraRYL:n vaatimukset.

Kuvassa 45 on esitetty pistekohtaisesti tiivistyssuhteen riippuvuus kantavuudesta. Kalibrointipisteissä mitattujen kantavuusarvojen perusteella lasketut tiivistyssuhteet olivat enimmäkseen vähän yli yhden, joten koealueet olivat erittäin hyvin tiivistettyjä. Tässä aineistossa tiivistyssuhde ei riippunut merkittävästi kantavuudesta.

Tutkimuksessa ilmeni kuitenkin (kappale 3.2.3), että pudotuspainolaitteiden käyttöohjeiden mukaisesti kussakin mittauskohdassa oli tehty yksi esikuormitus (tiivistyspudotus) ennen kahta varsinaista mittauspudotusta. Tiivistyspudotuksessa käytettävän kuormituksen suuruutta ei ole määritetty käyttöohjeessa. Jos tiivistyspudotus tehdään liian isolla kuormituksella, se vesittää koko tiivistyssuhteen laatuvaatimuksena käytön periaatteen, jonka mukaan huonosti tiivistetyn kohdan kantavuus paranee ensimmäisen pudotuksen aiheuttaman tiivistyksen johdosta enemmän kuin hyvin tiivistetty kohta ja siksi tiivistystyö on tehty sitä paremmin mitä pienempi suhde  $E_2/E_1$  on.

Tiivistyssuhteen mittaamisohjetta on tarkistettava siten, että

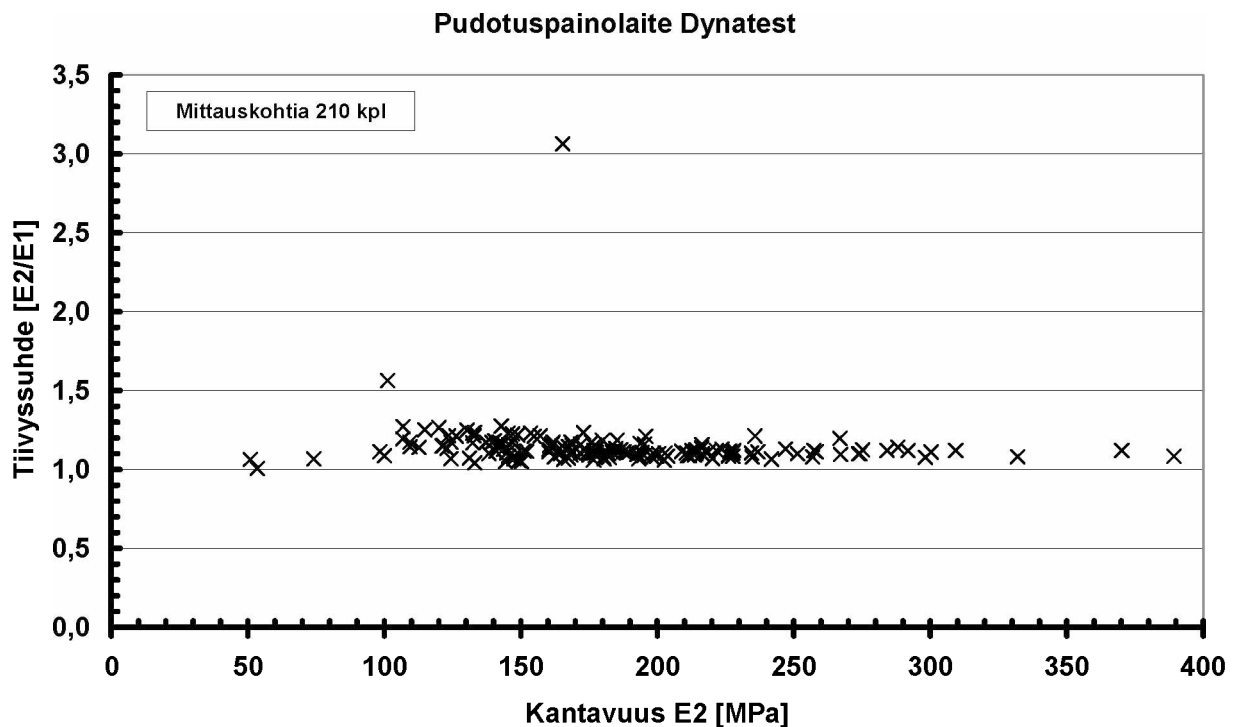
- Joko mittauskohtaa tasoittavaa tiivistyspudotusta ei tehdä ollenkaan tai sen suuruus säädetään riittävän pieneksi.
- Esikuormituksen (tiivistyspudotuksen) suuruus tulee aina ilmoittaa tutkimustulosten yhteydessä.

Koska tiiviyssaste, tiivistyssuhde ja kuivairtoteiheyys eivät korreloineet jyrämittarin mittaustulosten kanssa, keskityttiin tutkimuksen kalibrointimenetelmien käytössä niiden asemasta jyrän mittaustulosten kanssa paremmin yhteensopiviin vertailumenetelmiin (pudotuspainolaite ja levykuormituskoe).



Taulukko 14. Kantavuusarvojen minimi, maksimi ja keskiarvot kalibrointikoe-alueiden mittauspisteissä (Koko aineisto).

Kohde		Kantavuus E2 MPa	Tiiviyssuhde E2/E1
Yksityistie Y5 Kk	Minimi	193,8	1,1
	Maksimi	389,3	1,2
	Keskiarvo	254,7	1,1
Yksityistie Y8 Kk	Minimi	98,4	1,0
	Maksimi	180,4	1,2
	Keskiarvo	145,4	1,1
Vuosaari kenttä Kk	Minimi	160,3	1,1
	Maksimi	212,7	1,2
	Keskiarvo	177,7	1,1
Henttaankaari kk	Minimi	112,7	1,0
	Maksimi	218,6	1,2
	Keskiarvo	165,7	1,1
Lukukuja Jk	Minimi	50,9	1,0
	Maksimi	165,4	3,1
	Keskiarvo	124,8	1,3
Henttaan puistok. Jk	Minimi	107,0	1,1
	Maksimi	266,9	1,3
	Keskiarvo	170,1	1,2
Lukukatu Kk	Minimi	124,4	1,1
	Maksimi	223,7	1,2
	Keskiarvo	182,7	1,1
Lukukuja Kk	Minimi	160,4	1,1
	Maksimi	216,4	1,2
	Keskiarvo	191,5	1,1
Lukkuja, pp-tie Kk	Minimi	120,1	1,1
	Maksimi	195,4	1,3
	Keskiarvo	160,3	1,2



Kuva 45. Tiiviyssuhteen riippuvuus kantavuudesta kalibrointikoealueiden yksittäisissä mittauskohdissa (210 kpl).

### 3.4 Proctor- ja kiertotiivistyskokeet

Koerakenteista tehdyille materiaaleille tehtiin tiivistyskokeita parannetulla Proctor-menetelmällä (SFS-EN 13286-2, muotti D 152 mm) ja ICT-kiertotiivistimellä (muotti D 150 mm).

Runsaan veden valumisen vuoksi osalle materiaaleista ei voitu määrittää lainkaan kuivairtoteiheyden maksimia Proctor-koetulosten ”vesipitoisuus-kuivairtoteiheys”-käyrän avulla. Tällöin meneteltiin standardin SFS-EN 13286-2 liitteen D seuraavien ohjeiden mukaan:

Laskettiin kustakin näytteestä  $i$  tiivistyksen aikana valunut vesipitoisuus, joka oli näytteen alkuvesipitoisuuden ja loppuvesipitoisuuden erotus  $w_{oi} - w_{fi}$ . Sen jälkeen määritettiin ”vesipitoisuus valumisen alkaessa”  $w_B$  kolmen seuraavan vaihtoehdon perusteella:

- jos näytteen  $i$  alkuvesipitoisuuden  $w_{oi}$  osalta on voimassa seuraava lauseke  $0,3 \% < w_{oi} - w_{fi} \leq 0,5 \%$ , näytteen vesipitoisuutena valumisen alkaessa pidetään alkuvesipitoisuutta eli  $w_B = w_{oi}$ .
- jos jossakin näytteessä  $i$  alkuvesipitoisuuden ja loppuvesipitoisuuden erotus oli pienempi kuin  $0,3 \%$ -yksikköä eli  $w_{oi} - w_{fi} < 0,3 \%$  ja seuraavan näytteen  $i+1$  korkeammalle alkuvesipitoisuudelle oli voimassa lauseke  $w_{oi+1} - w_{fi+1} > 0,5 \%$ , vesipitoisuus valumisen alkaessa laskettiin kaavalla  $w_B = (w_{oi} + w_{oi+1})/2$ . Edellinen kaava on voimassa vain, jos  $w_{oi+1} - w_{oi} \leq 1 \%$ .

- Jos erotus  $(w_{oi} - w_{oi+1}) > 1\%$ , oli tarpeen tiivistää vielä yksi lisänäyte, jonka alkuväpitoisuus oli välillä  $w_{oi} - w_{oi+1}$ .

Näytteet kuivattiin lämpökaapissa ja kuivairtoteihs laskettiin kaavalla 3.

$$\rho_d = 100 \times \rho / (100 + w_{Fi}) \quad (3)$$

jossa

$\rho_d$	on tiivistetyn näytteen kuivairtoteihs (g/cm <sup>3</sup> )
$\rho$	on tiivistetyn märän näytteen märkäirtoteihs (g/cm <sup>3</sup> )
$w_{Fi}$	on näytteen loppuväpitoisuus (% kuivamassasta)

Kuivairtoteihs  $\rho_d$  loppuväpitoisuuden  $w_{Fi}$  funktiona voidaan esittää graafisesti kuvana x-y koordinaatistossa.

Näytteistä, joista valuu vesi nopeasti läpi, ilmoitetaan raportissa:

- $\rho_B$  laboratoriossa määritetty vertailuteihs runsaasti vettä valuille kiviaineksille (maksimikuivairtoteihsden asemasta)
- $w_B$  väpitoisuus valumisen alkaessa.

Laboratoriossa vertailuteihs runsaasti vettä valuille kiviaineksille vastaa väpitoisuutta valumisen alkaessa.

Kiertoteihsinkokeet tehtiin näytteillä, joiden halkaisijat olivat 150 mm. Näytteitä tiivistettiin 200 kierrosta. Kiertoteihsinnäytteillä oli sama koostumus kuin Proctor-näytteillä. Näytteistä määritettiin optimikosteus ja maksimikuivairtoteihs.

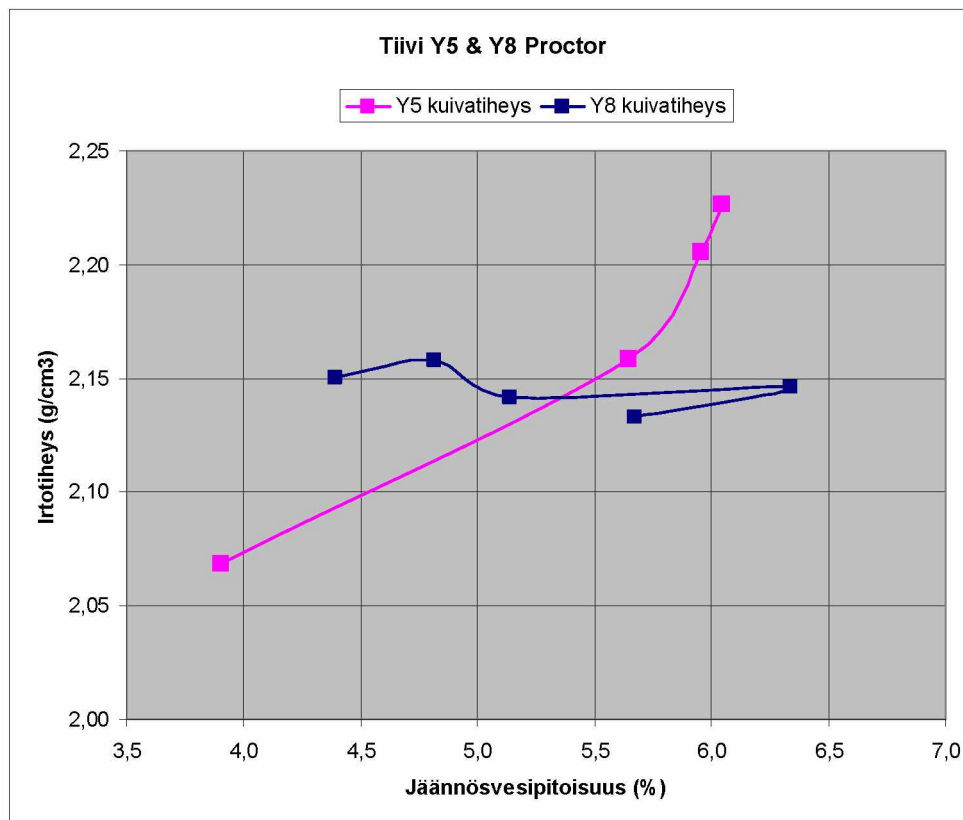
#### Nummelan koekohde

Nummelan koekohteen yksityisteiden Y5 ja Y8 päällysrakenteessa käytetyille murskeille KaM 0/56 mm ja yksityistien Y8 hiekalle tehtiin maksimikuivairtoteihsden ja optimikosteuden määritykset Parannetulla Proctor-menetelmällä SFS-EN 13286-2. Proctor- tulokset on esitetty kuvassa 46.

Runsaan veden valumisen vuoksi Proctor-kokeessa ei voitu määrittää yksityisteiden Y5 ja Y8 murskeille kuivairtoteihsden maksimia eikä sitä vastaavaa optimikosteutta. Siksi näiden osalta toimitettiin standardin SFS-EN 13286-2 liitteen D mukaisella, edellä kuvatulla tavalla.

Tien Y5 murskeen kuivairtoteihs veden valumisen alkaessa ( $\rho_B$ ) oli 2,16 g/cm<sup>3</sup> ja väpitoisuus ( $w_B$ ) oli 5,6 % ennen kivisyyskorjausta. Kivisyyskorjauksen jälkeen tien Y5 vastaavat arvot olivat: kuivairtoteihs  $\rho_B = 2,19$  g/cm<sup>3</sup> ja väpitoisuus  $w_B = 5,3$  %.

Yksityistien Y8 murskeen kuvaaja "irtoteihs jäännösväpitoisuuden funktiona" on lähes vaakasuora runsaan veden valumisen vuoksi. Koska veden lisäys ei johda korkeampaan kuivatiheyteen valittiin suhteellisen alhaisella väpitoisuudella saavutettu kivisyyskorjattu kuivairtoteihs 2,21 g/cm<sup>3</sup> ja sitä vastaava optimikosteus 4,0 %.



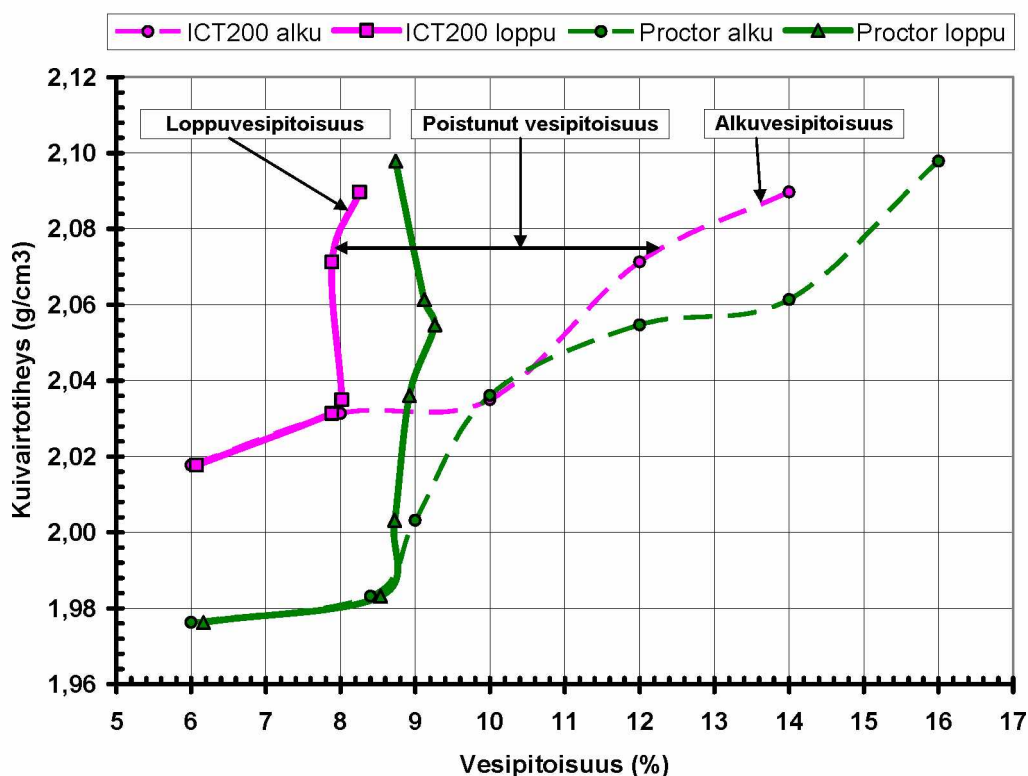
Kohde	Vesipitoisuus			95% Proct	
	tavoite	toteutunut	märkätiheys	kuivatiheys	
Y5	4,0	3,9	2,15	2,07	
	<b>6,0</b>	<b>5,6</b>	<b>2,28</b>	<b>2,16</b>	<b>2,05</b>
	8,0	6,0	2,34	2,21	
	10,0	6,0	2,36	2,23	
Y8	4,0	4,4	2,24	2,15	
	<b>5,0</b>	<b>4,8</b>	<b>2,26</b>	<b>2,16</b>	<b>2,05</b>
	6,0	5,1	2,25	2,14	
	8,0	6,3	2,28	2,15	
	10,0	5,7	2,25	2,13	

Kuva 46. Proctor-kokeen tulokset (murske 0/56 mm, yksityistiet Y5 ja Y8) ilman kivisyyskorjausta.

Myöskään yksityistien Y8 hiekalle ei Proctor-kokeessa saatu kuivairtitiheyden maksimiarvoa. Veden valumisen perusteella Proctor-kokeen kivisyyskorjattu irtotiheys oli 2,03 g/cm<sup>3</sup> ja sitä vastaava kosteus 9,3 %, kuva 47.

Kuvassa 47 on esitetty yksityistien Y8 hiekalle tehtyjen Proctor- ja ICT-kokeiden tulokset. Molempien kokeiden tuloksista on laskettu kuivairtitiheys sekä näytteisiin lisätyn vesipitoisuuden että tiivistyksen päättyessä näytteistä kuivaamalla määritetyn vesipitoisuuden funktiona.

Kuvan 47 käyrien haarautuminen osoittaa, millä kosteuspitoisuudella näytteistä alkoi poistua vettä. Poistunut vesipitoisuus (%-yks) näkyy käyriltä alku- ja loppuvesipitoisuuksien erotuksena. Proctor-kokeessa vettä alkoi erottua, kun vesipitoisuus oli 8 % ja ICT-kokeessa, kun vesipitoisuus oli 8,8 %



Kuva 47. Tien Y8 hiekan kuivairtitiheyden riippuvuus näytteen alku- ja loppu-vesipitoisuudesta ICT- ja Proctor- kokeissa. Veden erottuminen näytteistä.

Proctor-kokeen ja ICT-kiertotiivistinkokeiden tulosten yhteenveto yksityisteiden Y5 ja Y8 kiviaineksilla on esitetty taulukossa 16.

Proctor- ja ICT-kokeiden perusteella on esim. Stabiloitiohjeessa annettu stabiloidun massan tavoitettiiviydeksi joko 95 % Proctor-tiiviydestä tai 96 % 200 r tiivistetyn ICT-näytteen tiiviydestä. Taulukossa 17 on esitetty näiden ohjeiden mukaiset tiivysarvot kohteiden Y5 ja Y8 kiviaineksille.

Taulukko 15. Proctor- ja kiertotiivistin kokeiden tulokset (kohteet Y5 ja Y8).

Materiaali	Testi	Kuivairtitiheys (g/cm³)	Optimiviesipitoisuus (%)
Y5 murske	Proctor	2,19	5,3
	ICT 50	2,15	6,1
	ICT 200	2,25	6,1
Y8 murske	Proctor	2,21	4,0
	ICT 200	2,21	5,8
	ICT 400	2,25	3,6
Y8 hiekka	Proctor	2,03	9,3
	ICT 200	2,04	8,8
	ICT 400	2,08	6,9

Taulukko 16. Tavoitetiiviyysvertailu: 95 % Proctor ja 96 % ICT 200 r.

	Kuivairtitiheys (g/cm <sup>3</sup> )		
	Y5 KaM	Y8 KaM	Y8 hiekka
100 % Proctor	2,19	2,21	2,03
95 % Proctor	2,08	2,10	1,93
ICT 200	2,25	2,21	2,04
96% ICT 200	2,16	2,12	1,96

### Suurpellon koekohde

Suurpellon Lukukadun ja Lukukujan kantavan kerroksen murskeille tehtiin sekä Proctor- että kiertotiivistinkokeet materiaalien vertailutiiviyden ja optimivesipitoisuuden määrittämiseksi. Murskeiden rakeisuudet on esitetty liitteessä 6.

Proctor-koe tehtiin standardin SFS-EN 13286-2 mukaisesti kiviainekselle, josta oli poistettu yli 32 mm rakeet.

Kiertotiivistinmenetelmässä kivisyyskorjaus tehtiin samalla tavalla kuin Proctor-kokeessa poistamalla näytteestä ensin yli 32 mm rakeet. Sen jälkeen näytteitä tiivistettiin kiertotiivistimellä CEN-asetuksin 200 kierrosta eri vesipitoisuuksilla. Koesarjan näytteiden vesipitoisuudet valittiin yhden prosenttiyksikön porrastuksella kuten Proctor-kokeissa.

Taulukossa 18 on esitetty Lukukadun murskeen vertailutiiviyden ja optimikosteuden määritystulokset verraten kiertotiivistinmenetelmää Proctor-kokeeseen.

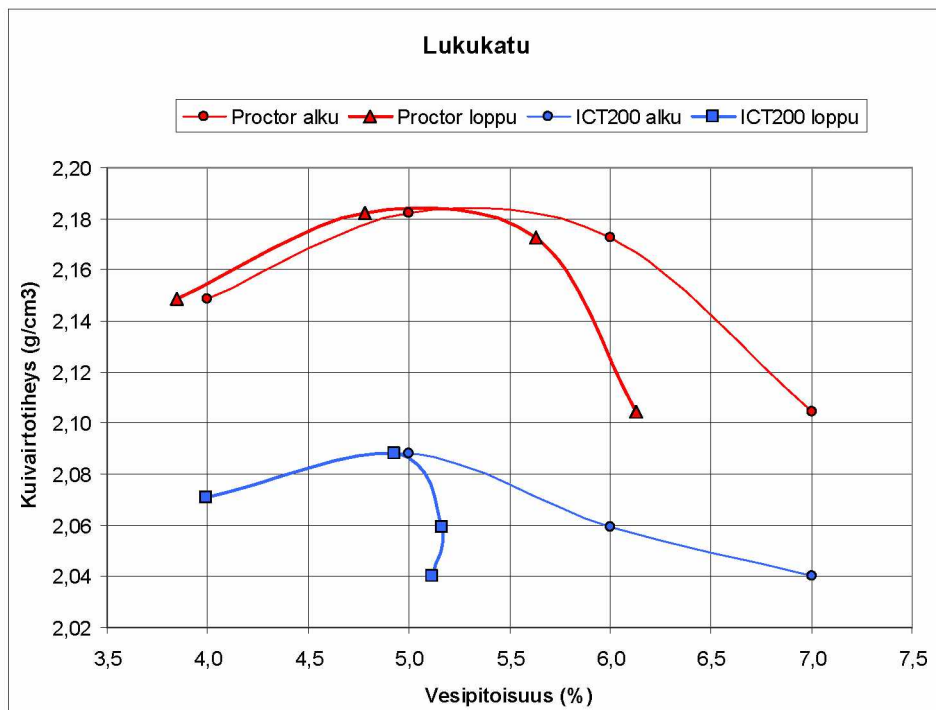
Kuivairtitiheyden riippuvuutta vesipitoisuudesta on havainnollistettu kuvassa 48. Kuvassa on esitetty kuivairtitiheyden muuttuminen erikseen näytteeseen kokeen alussa lisätyn vesipitoisuuden ja näytteessä tiivistystyön päättyessä olleen vesipitoisuuden funktiona. Lisätyn ja jääneen vesipitoisuuden erotus on poistunut näytteestä tiivistystyön aikana.

Proctor-menetelmän standardista EN13286-2 puuttuu ohje, tarkoittaako optimikosteus näytteen kosteuspitoisuutta tiivistyksen alussa, lopussa vai jotain siltä väliltä, joten tässä on noudatettu vanhaa käytäntöä eli tulos on ilmoitettu tiivistyksen päättyessä näytteessä jäljellä olevan kosteuden perusteella, jos kyseessä on ns. tavanomainen materiaali, jolle pystytään määrittämään maksimikuivairtitiheyttä vastaava optimikosteuspitoisuus. Samoin meneteltiin kiertotiivistintä käytettäessä.

Jos materiaalin rakeisuus oli sellainen, ettei maksimikuivairtitiheyttä pystytty määrittämään ja vesi valui jatkuvasti muotista ulos, valittiin optimivesipitoisuudeksi standardin EN 13286-2:2004 liitteen D mukaisesti.

Taulukko 17. Vertailutiheyden (kuivairtitiheyden) ja optimikosteuden määrittystapojen vertailu (Proctor ja kiertotiivistin), Suurpelto, **Lukukatu**, sitomaton kantava kerros.

Proctor				ICT 200 kierrosta			
Vesipitoisuus (%)		Irtotiheys (g/cm <sup>3</sup> )		Vesipitoisuus (%)		Irtotiheys (g/cm <sup>3</sup> )	
alussa	jäljellä	märkä	kuiva	alussa	jäljellä	märkä	kuiva
4	3,8	2,231	2,149	4	4,0	2,154	2,071
5	<b>4,8</b>	2,287	<b>2,182</b>	5	<b>4,9</b>	2,191	<b>2,088</b>
6	5,6	2,295	2,173	6	5,2	2,166	2,059
7	6,1	2,233	2,105	7	5,1	2,144	2,040
kuivairtitiheys (g/cm <sup>3</sup> )			<b>2,182</b>	kuivairtitiheys (g/cm <sup>3</sup> )			<b>2,088</b>
optimivesipitoisuus tihkuessa (%) *)			<b>4,8</b>	optimivesipitoisuus (%)			<b>4,9</b>
yli 32mm rakeet (%)			4,29	yli 32mm rakeet (%)			4,29
rakeiden tiheys (g/cm <sup>3</sup> )			2,650	rakeiden tiheys (g/cm <sup>3</sup> )			2,650
korjattu kuivairtitiheys (g/cm <sup>3</sup> )			<b>2,191</b>	korjattu kuivairtitiheys (g/cm <sup>3</sup> )			<b>2,101</b>
korjattu optimivesipitoisuus (%)			<b>4,6</b>	korjattu optimivesipitoisuus (%)			<b>4,7</b>
*) kuivairtitiheyden maksimikohta							



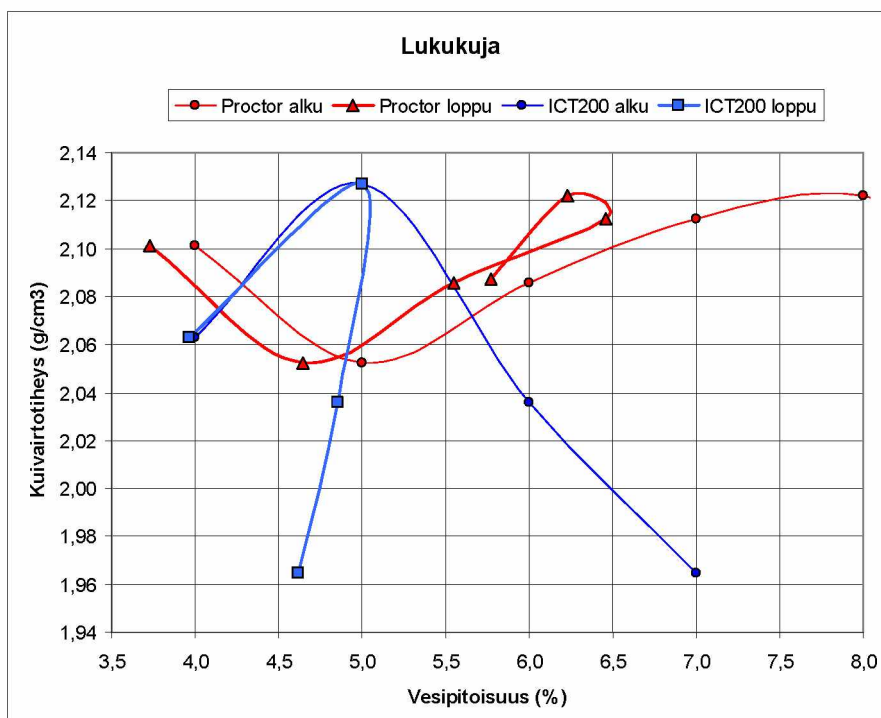
Kuva 48. Kuivairtitiheyden riippuvuus näytteeseen lisätystä ja näytteeseen jääneestä kosteudesta (Proctor ja kiertotiivistin), Suurpelto, **Lukukatu**, sitomaton kantava kerros.

Taulukossa 19 ja kuvassa 49 on esitetty vastaavasti Lukukujan murskeen vertailutiiviyden ja optimikosteuden määrittäminen.



Taulukko 18. Vertailukuivairtoteiheyden ja optimikosteuden määrittystapojen vertailu (Proctor ja kiertotiivistin), Suurpelto, **Lukukuja**, kantava kerros.

Proctor				ICT 200 kierrosta			
Vesipitoisuus (%)		Irtotiheys (g/cm <sup>3</sup> )		Vesipitoisuus (%)		Irtotiheys (g/cm <sup>3</sup> )	
alussa	jäljellä	märkä	kuiva	alussa	jäljellä	märkä	kuiva
4	3,7	2,180	2,101	4	4,0	2,145	2,063
5	4,6	2,148	2,053	5	5,0	2,233	<b>2,127</b>
6	5,5	2,201	<b>2,086</b>	6	4,9	2,135	2,036
7	6,5	2,249	2,113	7	4,6	2,056	1,965
8	6,2	2,254	2,122				
9	5,8	2,208	2,087				
kuivairtoteiheys tihkuessa (g/cm <sup>3</sup> )				kuivairtoteiheys (g/cm <sup>3</sup> )			
optimivesipitoisuus tihkuessa (%) *)				optimivesipitoisuus (%) *)			
yli 32mm rakeet (%)				yli 32mm rakeet (%)			
rakeiden tiheys (g/cm <sup>3</sup> )				rakeiden tiheys (g/cm <sup>3</sup> )			
korjattu kuivairtoteiheys (g/cm <sup>3</sup> )				korjattu kuivairtoteiheys (g/cm <sup>3</sup> )			
korjattu optimivesipitoisuus (%)				korjattu optimivesipitoisuus (%)			
*) EN 13286-2:2004, liite D, kohta D4							



Kuva 49. Kuivairtoteiheyden riippuvuus näytteeseen lisätystä ja näytteeseen jääneestä kosteudesta (Proctor ja kiertotiivistin), Suurpelto, **Lukukuja**, sitomaton kantava kerros.

Taulukossa 20 on esitetty yhteenveto Suurpellon kantavan kerroksen murskeille määritetyistä vertailutiiviyksistä ja optimikosteuksista. Tiivistystavoite voidaan ilmoittaa prosentteina vertailutiiviydestä. Taulukon 20 mukaan 96 % 200 kierrosta kiertotiivis-

timellä tiivistetyn näytteen tiiviydestä vastasi 92 % Lukukadun kantavan kerroksen murskeen Proctor-tiiviydestä ja 98 % Lukukujan kantavan kerroksen murskeen Proctor-tiiviydestä.

*Taulukko 19. Yhteenveto vertailutiheyden määrittelytuloksista (Proctor ja kiertotiivistin), Kantava kerros, Suurpelto.*

		Vertailu- tiheys	Optimi- vesipitoisuus		Kuivairtitiheys (g/cm <sup>3</sup> )	
					Lukukatu	Lukukuja
<b>Lukukatu</b>	Proctor	2,191	4,6	100 % Proctor	2,191	2,087
	ICT 200	2,101	4,7	95 % Proctor	2,081	1,983
				ICT 200	2,101	2,128
<b>Lukukuja</b>	Proctor	2,087	6,0	96% ICT 200	2,017	2,043
	ICT 200	2,128	5,0	Proct 95%/ 96% ICT200r	1,03	0,97
				96% ICT 200 vastaa	92 % Proct	98 % Proct

## 4 Johtopäätöksiä

Tutkimuksen tiivistyskokeiden perusteella voidaan tehdä seuraavia johtopäätöksiä:

- Tiivi- projekti tuotti runsaasti tietoa, jota voidaan hyödyntää sitomattomien materiaalien tiivistystyön kehittämisessä. Projektin julkaisut (tutkimusraportti, jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen käyttö- ja työmaakalibrointiohje, muutokset sitomattomien kerrosten tiivistystöiden laatuvaatimuksiin sekä standardiehdotus kiertotiivistimen käytöstä maksimikuivairtotehden ja optimikosteuden määrittämisessä) muodostavat kokonaisuuden, jonka avulla tiivistystyön rakennusautomaation ja koko tiivistystyömaan kattavien sähköisten laatudokumenttien tuottama lisätieto voidaan hyödyntää urakoitsijan oman työn laadunohjauksessa ja tilaajan laadunvalvonnassa.
- Jatkuvatoimisen tiivistyksentarkkailumenetelmän käyttöönotto edellyttää tietoa ja osaamista urakoitsijoilta, rakennuttajilta ja jyrin maahantuojilta.
- Jyrän jatkuvatoimisen tiivistyksentarkkailulaitteen tuottaman, paikkatietoon sidotun, tiivistystyötä kuvaavan tiedon avulla saadaan hyvä kokonaiskuva tiivistystyön tasalaatuisuudesta. Tiivistyksentarkkailulaitteen mittaustulokset voidaan tarvittaessa muuntaa kantavuutta kuvaaviksi arvoiksi työkohteessa tehtävien vertailumittausten avulla. Tällöin saadaan tietoa kantavuudeltaan suunniteltua heikommista kohdista. Heikon kantavuuden syyt voidaan selvittää ja tehdä tarvittaessa rakenteen kestävyyttä parantavia toimenpiteitä. Jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen tieto tiivistystyön tasalaatuisuudesta voidaan tallentaa sähköisessä muodossa olevaan laatudokumenttiin.
- Jyrän tiivistystyön vaatimustenmukaisuus osoitetaan InfraRYL:n mukaan tiiviyssasteen tai tiiviyssuhteen avulla. Jyrän mittaustulosta ei voitu kuitenkaan muuntaa suoraan tiiviyssasteeksi tai tiiviyssuhteeksi, koska nämä laatuvaatimusparametrit eivät korreloineet jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen mittaustulosten kanssa. Tämä johtui siitä, että vaikka tiivistettävän kerroksen tiiviyssasteen nousu ja tiiviyssuhteen aleneminen parantavatkin sen kantavuusominaisuuksia, kantavuuteen ja samalla jyrämittarin tuloksiin vaikuttaa olennaisesti myös tiivistettävän kerroksen alustan ominaisuuksien vaihtelu. Siinä vaiheessa, kun kerros on tiivistetty jyrämittarin perusteella mahdollisimman hyvin, tiiviyssasteen tai tiiviyssuhteen ja jyrämittarin tulosten välillä ei pitäisikään olla enää korrelaatiota, koska kantavuuden vaihtelu johtuu silloin muista syistä kuin riittämättömästä jyräskertamäärästä.
- Jyrän jatkuvatoimista tiivistyksentarkkailua suositellaan käytettäväksi siten, että jyrällä tiivistetään koko tiivistettävä alue joka kohdassa, kunnes jyrän mitalaitteen osoittama tiivistysarvo ei enää kasva. Näin varmistetaan se, että liikenteen aiheuttama jälkitiivistyminen ja urautuminen jäävät mahdollisimman vähäisiksi. Kun tiivistystyössä käytetään jatkuvatoimista, dokumentoivaa ja paikkatietoon sidottua tiivistyksentarkkailua, voidaan varmistaa, ettei kohteeseen jää paikallisia ali- tai ylitiiivistettyjä kohtia. Jyrämittarin tulosedokumenttien perusteella heikoimmissa kohdissa osoitetaan tiivistystyön vaatimustenmukaisuus joko tiiviyssaste- tai tiiviyssuhtemääriä. Tämä on tarpeen sen varmistamiseksi, että tiivistymisen päättymisen ei johdu esim. väärin valitusta jyrästä, jyräysparametreista, optimista poikkeavasta tiivistettävän materiaalin vesipitoisuudesta tai rakeisuudesta. Jos tiivistystyö todetaan vaatimusten mu-

kaiseksi, selvitetään muut syyt alhaisiin jyrämittariarvoihin (esim. tiivistettävän kerroksen alustan suunniteltua huonompi kantavuus tai jyrän kaksoishyppy).

- Jyrämittarin mittaamaa suhteellista kantavuutta (jäykkyyttä) ei tarvitse välttämättä muuntaa kalibrointimittausten avulla kantavuusmittausten mukaisiksi yksiköiksi, koska heikoimpien kohtien laatumittaukset voidaan kohdistaa myös jyrämittarin arvojen perusteella oikeisiin kohtiin. Kalibrointimittausten avulla saadaan kuitenkin enemmän tietoa koko tiivistetyn alueen kantavuuden vaihtelusta ja voidaan verrata tuloksia tiivistettävän kerroksen suunnittelukantavuuteen.
- Parhaiten tiivistyksen tarkkailulaitteen vertailumenetelminä toimivat levykuormituskoe ja pudotuspainolaite Dynatest. Myös raskaalla Loadmanilla oli Nummelan kohteessa riittävä korrelaatio jyrän mittaustulosten kanssa.
- Kalibrointimittaukset tulee tehdä mahdollisimman pian sen jälkeen, kun jyrä on tiivistänyt kalibrointialueen, koska rakenteen kuivuminen ja kastuminen muuttavat rakenteen jäykkyyttä.
- Radiometriset tiheydenmittausmenetelmät eivät soveltuneet jyrämittarin kalibrointiin, koska niiden mittaussyvyys on merkittävästi jyrän mittaussyvyyttä pienempi ja koska menetelmät mittaavat ei-asioita.
- On tärkeä tuntee myös jyrän mittaustulosten rajoitukset. Jyrän mittalaitetta ei voida kalibroida esim. koealueilla, joille raskas työmaaliikenne on painanut ajourat. Tiivistettävä alusta voi muuttua myös niin jäykäksi, että valssi pyrkii värähtelemään epävakaasti kaksoishyppyä tiivistettävän kerroksen päällä. Silloin jyrämittarin arvot muuttuvat virheellisen alhaisiksi. Hyppykohdat on merkittävä laatudokumenttiin, jotta ne voidaan ottaa huomioon mittaustulosten tulkinnassa. Kalibrointi voi epäonnistua myös silloin, kun liian lähellä tiivistettävää pintaa on hyvin kantavia kohtia (esim. louhetta), joiden kantavuuden jyrä mittaa (maksiarvona koko valssin leveydeltä), mutta pistemäinen pudotuspainolaitemittaus osuu lohkarakenteiden välissä olevaan pehmeämpään kohtaan (louherakenne on kiilattava riittävän paksulla ja rakeisuudeltaan sopivalla kiviaineksella). Hienorakeiset kerrokset tai pohjamaa voivat aiheuttaa myös sen, että jyrä mittaa pikemminkin vesipitoisuutta ja siitä aiheutuvaa kantavuuden vaihtelua kuin tiivistyksen tehokkuutta. Jyrän kalibrointiarvot pätevät vain alueilla, joilla on samanlainen pohjamaa, materiaalit ja kerrospaksuudet kuin kalibrointikoealueella. Jyrän mittaustulos ei korreloinut tiiviyssuhteen ( $E_2/E_1$ ) tai tiiviyssuhteen kanssa.
- Jotta jatkuvatoiminen tiivistyksen tarkkailumenetelmä yleistyisi, tulisi rakennuttajien edellyttää, että tiivistystyöstä tuotetaan koko tiivistettävän alueen kattava sähköinen laatudokumentti. Tähän laatudokumenttiin tulisi liittää paikkatietoon sidottuna tiivistystiedot ja ylityskertamäärät sekä jyrän paino, käytetty amplitudi ja frekvenssi,
- Jyrien maahantulojen tulisi järjestää jyrien tiivistyksen tarkkailulaitteiden käytön neuvonta ja opastus, jotta kynnys siirtyä uuden tekniikan käyttöön alenisi.
- Nykyiset rakentamisohjeet edellyttävät, että sitomattomat materiaalit tiivistetään lähellä optimia olevassa kosteudessa. Optimikosteuden määrittämiseksi

kiertotiivistimellä esitetään raportissa laboratoriokoemenetelmä. Tätä menetelmää ei kuitenkaan otettu vielä Tiivi-projektin tekemisiin InfraRYL-asiakirjan muutosehdotuksiin, koska menetelmästä ei ollut tarpeeksi käyttökokemuksia.

- InfraRYL:in sitomattomien kerrosten tiivistämistä koskeviin ohjeisiin tutkimustulosten perusteella tehdyt muutosehdotukset on toimitettu Liikennevirastoon jatkotoimenpiteitä varten.

Jatkuvatoimisen tiivistyksen tarkkailun tutkimustulokset ja projektissa tuotetut asiakirjat tulisi testata pilottihankkeessa. Siihen tulisi liittää myös tutkimushanke, jossa sovelletaan tutkimustulokset rakentamiskäytäntöä palvelevaan muotoon ja dokumentoidaan jatkuvatoimisen tiivistyksen tarkkailumenetelmän käyttökokemukset ja kehitystarpeet. Tässä tutkimuksessa esiin tulleita jatkokehittämistarpeita ovat esim. kaksoishyppytilanteiden tarkempi tunnistaminen kehittämällä jyrämittarin tulosten analysointia, maksimitiivistyksen saavuttamista koskevien sääntöjen täsmentäminen, tiivistettävän kerroksen alustan jyrämittaritulosten parempi hyödyntäminen seuraavan kerroksen jyräystulosten arvioinnissa ja pudotuspainolaitteen taipumasupilotietojen hyödyntäminen kanta-vuusvaihteluiden syiden ja korjaustarpeiden analysoinnissa.

## 5 TIIVI-projektin julkaisut

TIIVI-projektin tulokset on koottu kolmeen asiakirjaan:

- [1] Laukkanen K., Halonen P., Pyy E, Väylien ja kenttien tiivistystyön laatutason parantaminen uuden rakentamisteknologian avulla, TIIVI-projekti, Loppuraportti. Helsinki 2012, Liikenneviraston selvityksiä. (Raportin liitteenä 1 on ohje ” Sitomattomien maa-ainesten tiivistystyön jatkuvatoiminen laadunmittaus ja jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen kalibrointi”).
- [2] Sitomattomat kiviainesseokset. Vertailutiiviiden ja optimivesipitoisuuden määritysmenetelmä. Kiertotiivistys. Standardiehdotus 2010 (Toimitettu Liikennevirastoon).
- [3] Muutosehdotukset maapenkereiden ja sitomattomien päällysrakennekerrosten tiivistämistä koskeviin InfraRYL 2010:n kohtiin (Toimitettu Liikennevirastoon).

## Kirjallisuusviitteet

- [1] Gahbauer, Michael, Gruber, Norbert, Schlögl, Franz, Flächendeckende Qualitätssicherungssysteme für die Bodenverdichtung. München 1995, Beiträge aus der Geotechnik, Technische Universität München, Schriftenreihe, Heft 21.
- [2] Adam, Dietmar, Grundlagen für eine umfassende Anwendung der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen, Erdbbau für Verkehrswege 20./21. Februar 1997.
- [3] Merkblatt für die Verdichtung des Unterbaues des Untergrundes im Straßenbau. Köln 2003, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- [4] Kontinuierlicher walzenintegrierter Verdichtungsnachweis. Erdarbeiten, Technische Vertragsbedingungen RVS 8S.02.6.
- [5] Yttäckande packningskontroll. Metodbeskrivning 603:1994, Vägverket Publikation 1994:76.
- [6] Hamm Compaction Navigator. Operator short manual, version Beta 23.
- [7] Introduction to Intelligent compaction on soil. Caterpillar 2007, QEDQ1299.
- [8] Calibration of the GPS-navigator. Wirtgen Group. Hamm Calibration manual version 09.06.
- [9] Caterpillar operation and maintenance manual. SEBU8159-01, December 2007.
- [10] White, D., Thompson, M., Vennapusa, P., Field validation of intelligent compaction monitoring technology for unbound materials. St. Paul 2007, Minnesota Department of Transportation, Report MN/RC-2007-10.
- [11] Janhunen, Niko, Jatkuvan tiiviydentarkkailun mittaustulosten hyödyntäminen maarakennuksessa. Diplomityö Espoo 2010, Aalto yliopisto, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos.
- [12] InfraRYL20006 ja siihen myöhemmin tehdyt päivitykset, Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, Osa 1, Väylät ja alueet, RT 14-10878, Rakennustietosäätiö, Rakennustieto Oy.
- [13] Geotekniset laboratorio-ohjeet. 1 Luokituskokeet. Helsinki 1985, Suomen geoteknillinen yhdistys, Rakentajain kustannus Oy.
- [14] SFS-EN 13286-1. Sitomattomat ja hydraulisesti sidotut seokset. Osa 1: Vertailutiiviyden ja vesipitoisuuden määrittäminen. Johdanto, yleiset vaatimukset ja näytteenotto.
- [15] SFS-EN 13286-1. Sitomattomat ja hydraulisesti sidotut seokset. Osa 2: Vertailutiiviyden ja vesipitoisuuden määrittäminen. Proctor-tiivistys.
- [16] Törnqvist, Jouko, Laaksonen Rainer, ICT-koe maksimikuivatilavuuspainon mittaustuloksissa. Proctor-koevertailu. Espoo 1991, VTT/ Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio, tutkimusraportti nro TGL 1880/1991.
- [17] Browne, Michael, Feasibility of using gyratory compaction to determine compaction characteristics of soil. Montana 2006. Diplomityö, Montana State University.



- [18] Ping, W., Xing, G., Leonard, M., Yang, Z. Evaluation of laboratory compaction techniques for simulating field soil compaction, Phase 2. Tallahassee 2003. Florida State University, Research Report No FL/DOT/RMC/BB-890(F).
- [19] Kalde bitumenstabiliserte bærelag. Oslo 1997, Statens Vegvesen, Håndbok 198.
- [20] Laukkanen, K. Laaksonen, R., Bitumia sisältävien kerrostabilointien kehittämistutkimus. Laboratoriokokeet. Helsinki 2007, Tiehallinnon selvityksiä 44/2007.
- [21] Päälysrakenteen stabilointi. Helsinki 2007, TIEH 2100055-v-07.

Tiivi-projekti

Ohje 30.12.2010

# Sitomattomien materiaalien jatkuvatoiminen tiivistystarkkailu ja jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen kenttäkalibrointi

## Sisältö

1	YLEISTÄ .....	2
1.1	Ohjeen käyttöalue .....	2
1.2	Käsitteet .....	2
2	MATERIAALI- JA LAITEVAATIMUKSET .....	3
2.1	Tiivistettävät materiaalit .....	3
2.2	Jyrälle asetetut vaatimukset .....	3
2.2.1	Jyrän mittauslaitteet ja niille asetetut vaatimukset .....	3
3	PAIKKATIEDON KOORDINAATISTOMUUNNOKSET .....	4
4	MITTAUSTULOKSET SUUNNITELMAKARTALLE .....	4
5	MITTAUSTULOKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT .....	4
5.1	Tiivistettävä kohde .....	4
5.1.1	Rakennekerrokset .....	4
5.1.2	Materiaalin rakeisuus .....	4
5.1.3	Vesipitoisuus .....	5
5.1.4	Kohteen geometria .....	5
5.2	Jyräystapa .....	5
5.2.1	Amplitudi .....	5
5.2.2	Taajuus .....	5
5.2.3	Staattinen viivakuorma .....	5
5.2.4	Ajonopeus .....	5
5.2.5	Valssin toiminta .....	6
5.2.6	Ajosuunta .....	6
5.2.7	Mittausssyvyys .....	6
5.2.8	Mittausjyräyksen ajankohta .....	6
6	KÄYTTÖSOVELLUKSIA .....	6
6.1	Yleistä .....	6
6.2	Tiivistys maksimitiiviyteen ja vertailu heikoimpiin kohtiin .....	6
6.3	Tiivistyksentarkkailulaitteen työmaalibrointi .....	7
6.3.1	Yleistä .....	7
6.3.2	Vertailukokeet .....	7
6.3.3	Koealueiden valinta .....	7
6.3.4	Jyrän valinta ja asetukset .....	8
6.3.5	Kalibrointimittausten suoritus .....	8
6.3.6	Tiivistäminen kalibroinnin jälkeen .....	10
7	GPS-PAIKANNUS JA TIEDONSIIRTO .....	10
8	TIIVISTYSTYÖN SÄHKÖINEN LAATUDOKUMENTTI .....	10

# 1 Yleistä

## 1.1 Ohjeen käyttöalue

Tämä ohje soveltuu käytettäväksi rakennustyömaalla sitomattomien pengermateriaalien ja päällysrakennekerrosten tai kylminä levitettävien kerrosstabilointien tiivistystöiden laadun ohjaukseen ja vaatimustenmukaisuuden osoittamiseen, kun tiivistystyössä käytetään jatkuvatoimisella tiivistyksentarkkailulaitteella ja GPS-paikannuksella varustettua täryjyrää. Ohjetta voidaan käyttää sekä tie-, rautatie-, katu- että kenttärakenteiden tiivistystöissä.

Tiivistystyön tarjouspyynnössä ja urakkasopimuksessa ilmoitetaan, vaaditaanko koko tiivistettävästä alueesta jyrän mittaustulosten avulla tuotettu sähköisessä muodossa oleva laatudokumentti vai käytetäänkö jyrän mittalaitteita muulla tavoin laadun osoittamiseen.

Ohjeen mukaan voidaan suorittaa:

- jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen työmaakalibrointi (jyramittarin arvojen muuntaminen kantavuusarvoiksi),
- liittää sähköisessä muodossa olevat suunnittelukartat mittaustuloksiin,
- esittää tiivistystyön laatu ja suoritustapa yhtenäisellä tavalla koko tiivistettävältä alueelta kerroksittain ja
- osoittaa, että tiivistystyötä on jatkettu, kunnes vaatimukset on saavutettu tai rakenne ei enää tiivisty.

## 1.2 Käsitteet

### Mittausvyvyys

Mittausvyvydellä tarkoitetaan jyrän valssin alla olevaa rakennepaksuutta, joka vaikuttaa jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen mittaustuloksiin

### Tiivistysvyvyys

Tiivistysvyvydellä tarkoitetaan jyrän valssin alla olevaa rakennepaksuutta, joka pysytään tiivistämään valituilla jyräparametreilla vallitsevissa materiaali-, kosteus- ja sääolosuhteissa tavoitettuihin.

### Jatkuvatoiminen tiivistyksentarkkailu

Jatkuvatoiminen tiivistyksentarkkailu toimii jyrän värähtelevän valssin ja maakerroksen dynaamisessa vuorovaikutuksessa. Täryvalssille on luonteenomaista, että värähtelyliike saadaan aikaan pyörivässä valssissa kiinni olevien epäkeskojen avulla.

Menetelmä soveltuu periaatteessa kaikille maa-aineksille, murskeille ja kerrosstabilointimateriaaleille, jotka ovat täryjyrällä tiivistettävissä. Mittaukset tehdään tiivistystyön aikana, joten tiivistymisen edistyminen (tiivistysvaikutus) todetaan jo tiivistämisen aikana ja heikosti tiivistyvät kohdat voidaan paikallistaa jo varhaisessa vaiheessa.

Myös staattisilla jyrillä tiivistettyjen maarakenteiden tiivistymistä on mahdollista tutkia jälkikäteen jatkuvatoimisella tiivistyksentarkkailulaitteella varustetulla täryjyrällä.

## 2 Materiaali- ja laitevaatimukset

### 2.1 Tiivistettävät materiaalit

Jatkuvatoiminen tiivistyksentarkkailu soveltuu kaikille maapenger materiaaleille ja kiviaineksilla, jotka ovat täryjyrillä tiivistettävissä, jos niiden rakeisuudet, tiivistyspaksuudet ja kosteudet täyttävät InfraRYL:n vaatimukset. Jos maksimiraekoko on yli 120 mm, voi raekoosta johtuva tiivistettävän kerroksen epätasaisuus aiheuttaa tuloksiin liian suurta vaihtelua.

Jos kiviaineksen hienoaineksen ( $< 0,063$  mm) pitoisuus on yli 15 m-%, liian suuri vesipitoisuus ja kiviaineksen huono vedenläpäisevyys voivat aiheuttaa mittaustulosten heikkenemisen tiivistystä jatkettaessa.

### 2.2 Jyrälle asetetut vaatimukset

Sileällä teräspintaisella täryvalssilla ja vetävillä kumipyörillä varustettu täryjyry soveltuu jatkuvatoimiseen tiivistyksentarkkailuun, koska se pystyy liikkumaan vakionopeudella, omaa hyvän liikkuvuuden, pystyy liikkumaan myös kaltevilla pinnoilla ja irrallisen maa-aineksen päällä. Jyrän koko valitaan tiivistettävän materiaalin kerrospaksuuden ja maksimiraekoon perusteella.

Jyrän valssin värähtelytaajuus ja ajonopeus jyräyskaistalla pitää pystyä pitämään vakiona.

#### 2.2.1 Jyrän mittausräätit ja niille asetetut vaatimukset

Jyrän mittausräätit sisältävät seuraavat varustet

- kiihtyvyyssanturi (mittaa valssin värähdysliikkeen)
- prosessoriyksikkö (dynaamisten mittaustulosten laskentaa varten)
- GPS-läitteistö, jonka avulla jyrän (mittausvalssin keskipisteen) sijainti tallentuu jatkuvatoimisesti jyrän mittaustietojen yhteyteen
- kuvaruutunäyttö (näyttää hetkelliset mittausräätit jyrän kuljettajalle)
- tiedonkäsittely-yksikkö (mittaustulosten manipulointisuoja jattu tallennus ja sijaintitiedon tallennus koordinaatistoon).

Jyrän mittausräätteille asetetaan seuraavat vaatimukset:

- jyrän tiedonkeruujärjestelmän tietojen tulee olla suojattu tietojen manipuloinnilta (jyrän paikkatieto, ylityskerrat, ajonopeus, valssin frekvenssi, valitun teoreettisen amplitudin ja tiivistymistä kuvaavien mittaustulosten ja hyppyjen mittausräätit ja tallennus),
- asennuksen tulee soveltua yleisesti käytössä oleviin jyräin,
- mittausräätteihin tulee tuottaa tulokset käytettävien tietojärjestelmien, tallennusten ja dokumentointitapojen kanssa yhteensopivassa muodossa,
- jyrän mittaustieto tulee voida sitoa koordinaatistoon,
- jyräparametrit tulee pystyä liittämään mittaustuloksiin ja laatu dokumenttiin,
- mittausräätteihin tulee pystyä esittämään yleiskuva vaadituista mittausräätteistä ja näyttää ne suoraan jyrän kuljettajan näytöllä,
- jyrän ajonopeus tulee mittausräätin aikana mitata ja tallentaa,
- jyrän hyppääminen tulee merkitä tuloksiin ja hyppykohtien sijainnit tulee tallentaa tulosten yhteyteen.

### 3 Paikkatiedon koordinaatistomuunnokset

Jyrän mittaustulosten paikkatieto on sidottu satelliittipaikannuksen yleisesti käyttämään WGS 84-koordinaatistoon, jossa sijainti ilmoitetaan jatkuvana tietona pituus- ja leveysasteiden avulla. Rakennustyömaalla voi olla käytössä esim. metripohjainen VVJ-koordinaatisto.

Jotta jyrän mittaustieto voidaan yhdistää työmaan koordinaatistoon, tehdään työmaalla ensin vertailumittaukset käyttäen satelliittilautasta tai robottitakymetriä. Vertailulaitteella määritetään työmaalla vähintään kolmen pisteen sijainti. Vertailupisteitä on kuitenkin oltava niin monta, että jyräyskohde jää niiden rajoittamalle alueelle. Mittaustulokset tallennetaan mittalaitteen muistiin sekä jyrän WGS84- että työmaan VVJ-koordinaatistossa. Jyrän tietokone muuntaa sen jälkeen jyrämittarin tulosten paikkatiedot VVJ-koordinaateiksi, jos jyrässä on tämä valmius.

### 4 Mittaustulokset suunnitelmakartalle

Jos työmaan suunnitelmakartat ovat sähköisessä muodossa, ne kannattaa kopioida jyrän tietokoneelle. Kartta-aineisto hankitaan esim. yleisesti käytössä olevassa DVG-formaatissa, jota käytetään tie- ja katusuunnittelun AUTOCAD- ohjelmissa.

Jos jyrän tietokone tunnistaa tämän tiedostomuodon, tiivistyskohteen suunnitelmakartta pystytään siirtämään jyrän mittaustulosten taustakuvaksi ennen mittausten suoritusta. Käytännössä tämä tapahtuu siten, että ensin jyrän paikkatietomittausten WGS 84-sijaintikoordinaatit muunnetaan edellä kuvatulla tavalla VVJ-koordinaateiksi ja sen jälkeen voidaan työmaan suunnitelmakartta viedä jyrän tietokoneelle. Kartta sidotaan työmaan koordinaatistoon kartan koordinaattien ja työmaalta mitattujen pisteiden koordinaattien avulla.

### 5 Mittaustuloksiin vaikuttavat tekijät

#### 5.1 Tiivistettävä kohde

##### 5.1.1 *Rakennekerrokset*

Kerroksellinen rakenne vaikuttaa dynaamisten mittaustulosten tasoon tai mahdollisesti valssin toimintatapaan, jos kerrosten välinen rajapinta on mittaussyvyyden sisällä. Syvemmällä sijaitsevat heikot kohdat vaikuttavat dynaamisiin mittaustuloksiin.

##### 5.1.2 *Materiaalin rakeisuus*

Raekoko ja rakeisuuskäyrä vaikuttavat dynaamisiin mittaustuloksiin, niiden tasoon ja muuttumiseen toisiaan seuraavien ylityskertojen aikana. Lajittumat ja lähellä pintaa olevat epähomogeeniset kohdat heikentävät mittaustulosten käyttökelpoisuutta, koska ne vähentävät jyrämittarin ja vertailulaitteen kantavuusmittausten tulosten välistä korrelaatiota.

### 5.1.3 *Vesipitoisuus*

Paras tiivistystulos saavutetaan, kun maamateriaalit tiivistetään optimikosteudessa. Jos tiivistettävän kerroksen vesipitoisuus on liian korkea, se ei tiivisty, jolloin mittausjärjestelmä havaitsee alhaisemman tiivistysarvon. Tiiviys ei parane useista ylityksistä huolimatta vaan saattaa jopa heikentyä.

### 5.1.4 *Kohteen geometria*

Kaltevilla tiivistettävillä alueilla, joilla jyrä pystyy liikkumaan, voidaan suorittaa myös jatkuvatoiminen tiivistyksen tarkkailu.

Jos sivukaltevuus on alle 5 %, sen vaikutus mittaustuloksiin on hyväksyttävissä rajoissa. Jos sivukaltevuus on suurempi, jyrän on vaikea säilyttää valittu ajolinja.

Mitä suurempi pituuskaltevuus, sitä suurempi on kaltevuuden vaikutus mittaustulosten eroon ajosuuntien välillä. Tämä korostaa sitä, että mittaus kannattaa tehdä vain yhteen ajosuuntaan.

Pienisäteisiä kaarteita tulee välttää kalibrointimittauskohtien valinnassa.

Pientareiden läheisyys ja luiskan korkeus vaikuttavat jyrän mittaustuloksiin.

## 5.2 *Jyräystapa*

### 5.2.1 *Amplitudi*

Jyrän valssin amplitudi on tiivistysparametri, joka vaikuttaa tiivistystehokkuuteen, mittaussyvyyteen, valssin toimintaan ja dynaamisten mittaustulosten tasoon. Suuremmalla amplitudilla saavutetaan suurempi tiivistysvaikutus ja mittaussyvyys, mutta kivirakeiden rikkoutumisen ja pinnan löyhtymisen riski kasvaa. Kalibrointimittausajon aikana amplitudi pidetään vakiona.

### 5.2.2 *Taajuus*

Värähtelyn taajuus tulee pitää mittaajyräyksen aikana mahdollisimman vakiona. Värähtelyn taajuuden muutokset vaikuttavat mittaustuloksiin. Värähtelyn taajuuden sallittu vaihteluväli on  $\pm 2$  Hz.

### 5.2.3 *Staattinen viivakuorma*

Jyrän valssin staattinen viivakuorma riippuu valssin ja sen rungon massasta ja valssin leveydestä. Mitä suurempi on staattisen jyrän viivakuorma, sitä suurempi on sen tiivistysvaikutus ja tiivistyisyvyys. Täryjyrässä dynaamisella viivakuormalla on suurempi merkitys tiivistysvaikutuksen ja mittaussyvyyden kannalta ja samalla suurempi vaikutus mittaustuloksiin.

### 5.2.4 *Ajonopeus*

Ajonopeus tulee valita vakioksi väliltä 2-6 km/h ja pitää sen jälkeen vakiona mittausajon aikana (sallittu vaihteluväli on  $\pm 0,2$  km/h).

### 5.2.5 Valssin toiminta

Valssin hyppäämistä tulee välttää, jos suinkin mahdollista. Jos valssi hyppää, pyritään hypyt estämään käyttämällä pienempää amplitudia tai suurempaa ajonopeutta.

### 5.2.6 Ajosuunta

Jyrän mittaukset suoritetaan vain yhteen ajosuuntaan ajettaessa.

### 5.2.7 Mittaussyvyys

Jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen mittaussyvyys riippuu erityisesti valssin staattisesta viivakuormasta, amplitudista ja frekvenssistä sekä tiivistettävästä materiaalista. Kerroksellisessa murskerakenteessa voidaan käyttää seuraavia ohjeellisia arvoja: Jyrän mittaussyvyys on yleensä suurempi kuin tiivistyssyvyys.

Jyräkoko	Jyrän mittaussyvyys
t	m
2	0,4 – 0,6
10	0,6 – 0,8
12	0,8 – 1,5

### 5.2.8 Mittausjyräyksen ajankohta

Tiivistyksen päättymisen ja mittausjyräyksen välinen aika tulisi olla mahdollisimman lyhyt, koska tiivistetyn pinnan mitattavat arvot muuttuvat väliaikana. Muutoksia aiheuttavat mm. työmaaliikenne ja sääolosuhteet.

## 6 Käyttösovelluksia

### 6.1 Yleistä

Tiivistyksentarkkailulaitteella varustettua jyrää voidaan käyttää kahdella vaihtoehtoisella tavalla tiivistystyön laadun ohjaukseen ja parantamiseen:

- Tiivistys jyrämittarin arvojen perusteella maksimitiiviyteen eli siihen asti, että lisäjyräyskerrat eivät enää paranna jyrämittarin tuloksia ja tekemällä heikoimmat arvot antaneiden kohtien vertailumittaukset,
- Jyrän mittaustulosten työmaakalibrointi.

### 6.2 Tiivistys maksimitiiviyteen ja vertailu heikoimpiin kohtiin

Jyrän jatkuvatoimista tiivistyksentarkkailua suositellaan käytettäväksi siten, että jyrällä tiivistetään koko tiivistettävä alue joka kohdassa maksimitiiviyteen eli alueen tiivistystä jatketaan, kunnes se ei enää tiivisty enempää.

Sen jälkeen mitataan kantavuudeltaan heikoimpien kohtien laatu tiiviysasteen tai tiiviyssuhteen avulla ja saadaan selville, täyttääkö tiivistystyö joka kohdassa InfraRYL laatuvaatimukset.



### 6.3 Tiivistyksentarkkailulaitteen työmaakalibrointi

#### 6.3.1 Yleistä

Tiivistyksentarkkailulaitteen mittaustulokset voidaan kalibroida työmaalla perinteisen tiivistetyn alueen kantavuutta mittaavan laitteen avulla. Kalibroinnin avulla muunnetaan työmaan paikallisista materiaaleista ja olosuhteista riippuvat jyrän tiivistystyöntarkkailulaitteen suhteelliset mittaustulokset kantavuuden mukaisiksi yksiköiksi.

Kalibrointi palvelee tiivistysurakoitsijan oman työn ohjausta ja toimii myös osana jyrästyön laadunvalvontaa.

#### 6.3.2 Vertailukokeet

Jyrä, tiivistettävä rakenne ja mittaussysteemi sekä kohteessa käytettävä amplitudi, frekvenssi ja ajonopeus muodostavat kokonaisuuden, joka kalibroidaan perinteisen mittaustuloksen mittaustuloksilla.

Dynaamiset mittaustulokset voidaan muuntaa kantavuusarvoiksi perinteisen kantavuudenmittauslaitteen avulla. Vertailulaitteeksi soveltuvat erityisesti levykuormituskoee ja riittävän raskaat pudotuspainolaitteet. Kevyiden laitteiden mittaussyvyys on niin pieni, että kerroksellisessa rakenteessa alempien kerrosten vaikutus ei tule näkyviin niiden mittaustuloksissa ja siksi niiden soveltuvuus vertailulaitteeksi on heikompi.

Jotta vältetään epäsuotuisia poikkeamia jyrän mittaustulosten ja vertailulaitteen korrelaatiossa, tulee erityistä huomiota kiinnittää:

- tiivistettävän kerroksen kosteuteen,
- tiivistetyn pinnan tasaisuuteen,
- pinnan kiinteyteen,
- vertailumittausten tekemiseen samoista pisteistä.

#### 6.3.3 Koealueiden valinta

##### Pinnan tasaisuus ja kaltevuudet

Tiivistystutkimuksen koealueeksi soveltuu parhaiten liikenneväylän kohta, jolla ei ole suurta pituuskaltevuutta tai pienisäteistä kaarretta. Suuri sivukaltevuus (> 5 %) vaikeuttaa jyrän pysymistä ajolinjalla. Suuri pituuskaltevuuden vaihtelu aiheuttaa poikkeamia jyrän mittaustuloksiin.

Tiivistettävällä pinnalla ei saa olla poikittaista epätasaisuutta kuten esim. kuorma-autojen ajouria, sillä jyrävalssin tulee koskettaa koko leveydeltään tasaisesti tiivistettävään pintaan.

Tiivistettävässä pinnassa ei saa olla epähomogeenisia kohtia, kuten suuria kiviä tai lohcareiden kärkiä lähellä pintaa, hienoa-aineksen lajittumakohtia tai suuria kosteusvaihteluja tiivistettävän kerroksen eri kohdissa. (Suuria paikallisia kosteusvaihteluja voi esiintyä esim. jos tiivistyskohteeseen ajetaan samaan aikaan mursketta sekä varastoidusta kasasta että murskaamolta).

### **Koealueen mitat**

Koealueen pituudeksi riittää 100 m ja leveydeksi valitaan liikenneväylillä yleensä koko tiivistettävän ajoradan jakavan tai kantavan kerroksen leveys. Tiivistettävä alue jaetaan jyräyskaistoihin, joiden limitys saa olla 5–30 % valssin leveydestä.

#### **6.3.4 Jyrän valinta ja asetukset**

Jyrä valitaan tiivistettävän alueen ja materiaalien perusteella. Jyrän valinnassa voidaan käyttää apuna InfraRYL:n kokemuseräistä taulukkoa T18110:T3. Sopiva jyrän kokoluokka esim. kantavien ja jakavien kerrosten tiivistyksessä on 12–13 t. Kalibrointimittauksissa käytetään yleensä alhaista amplitudia ja esim. 30 Hz taajuutta.

#### **6.3.5 Kalibrointimittausten suoritus**

##### **6.3.5.1 Alustan tiiviysarvon dokumentointi**

### **Mittausajo**

Tiivistettävän kerroksen alustan jyrämittaritulokset dokumentoidaan täryjyrällä ennen seuraavan kerroksen levitystä

Ensimmäinen jyräyskaista valmiiksi tiivistetyllä koealueella ajetaan mittausajona tärytys päällä. Sen jälkeen jyrä palaa samaa ajolinjaa pitkin ilman tärytystä. Tämä toistetaan kaksi kertaa.

Jos jonkin jyräyskaistan tiivistystulos poikkeaa merkittävästi muiden kaistojen tulokista, ajetaan sen päällä vielä 3 mittausajoa täry päällä.

Jos mittauksen aikana todetaan valssin kaksoishyppyjä, jyräysparametreja ei muuteta, mutta hyppykohdan sijainti dokumentoidaan.

### **Vertailumittaukset**

Alemman kerroksen vertailumittauksia varten valitaan jyrän tiedostosta vertailulaitteella tehtävien mittausten mittauskohdat, joiden tulisi edustaa kalibrointialueella alhaista, keskimääräistä ja korkeaa tiivistystulosta. Vertailumittaukset tehdään välittömästi jyrän mittausajojen jälkeen.

Alemman kerroksen jyrämittaritulokset voidaan muuntaa kantavuuksiksi, jos ne korreloivat riittävän hyvin esim. pudotuspainolaitteella tehtyjen vertailumittausten kanssa. Kantavuustuloksista voidaan haluttaessa laskea Odemarkin menetelmällä seuraavan kerroksen odotettavissa olevat kantavuudet ja mahdolliset suunnitelmien korjaustarpeet. Kantavuustuloksia voidaan hyödyntää myös ylemmän kerroksen laadun arvioinnissa (tiivistys/moduuli/kerrospaksuus). Näitä menettelytapoja ei ole kuitenkaan vielä testattu.

##### **6.3.5.2 Koejyräys**

Jatkuvan tiivistyksen tarkkailun avulla voidaan selvittää työmaan olosuhteissa optimaalinen tiivistystapa ja siihen liittyvien jyräyskertojen lukumäärä ja laatu. Samalla otetaan huomioon tarvittavat amplitudit ja staattiset ylityskertamäärät sekä mittausajojen varten valittava amplitudi, frekvenssi ja ajonopeus.

Koealueelle ajetaan tiivistettävä kiviaines ja levitetään sitä valittu kerrospaksuus.

### **Koealueen tiivistäminen**

Aluksi ajetaan jyrällä yksi tiivistyskaista täry päällä ja palataan sen jälkeen takaisin samaa ajolinjaa pitkin. Tätä toistetaan niin monta kertaa, että dynaamisissa tiiviysarvoissa ei havaita enää merkittävää muutosta. Tämä toistetaan kaikilla jyräyskaistoilla.

Jos mittausajojen aikana todetaan hyppytaipumusta merkittävässä määrin, keskeytetään jyräys valituilla jyräparametreilla ja tiivistys toistetaan alhaisemmalla amplitudilla tai suuremmalla ajonopeudella. Jos näillä jyräparametrien muutoksilla vältetään valssin hyppääminen, tehdään uusi kalibrointi näillä asetuksilla tai otetaan käyttöön työhön paremmin sopiva jyrä.

Viimeiseksi valittuja jyräparametreja käytetään sen jälkeen kaikilla tämän kalibrointi-alueen jyräyskaistoilla. Myös niillä kaistoilla, joilla aluksi käytettiin muita jyräysparametreja, tulee suorittaa yhtä monta mittausjyräyskertaa muutoksen jälkeen valituilla jyräparametreilla.

Kolmen seuraavan päivän kuluessa suoritetaan vielä yksi mittausjyräyskerta jokaisella jyräyskaistalla.

### **Vertailumittaukset**

Välittömästi viimeisen mittausajon jälkeen valitaan koealueelta vähintään kolme mittauskohtaa, joilla on alhainen tiivistysarvo, vähintään kolme kohtaa, jolla se on keskimääräinen ja vähintään kolme kohtaa, jolla se on korkea. Näistä vähintään yhdestä kohdasta tehdään vertailumittaus tarkoitukseen soveltuvalla vertailulaitteella (esim. levykuormituslaite tai pudotuspainolaite). Näitä mittauksia ei tehdä kohdista, joissa on todettu valssin hyppimistä.

Jos mittausajoissa ei voitu välttää valssin hyppimistä, vaikka jyräparametreja muutettiin, tehdään kuusi ylimääräistä mittausta vertailulaitteella näistä kohdista valiten kohtia, joissa oli alhainen, keskimääräinen tai korkea jyrän tiivistysarvo.

#### ***6.3.5.3 Tulosten käsittely***

Kalibrointialueen mittaustulosten perusteella lasketaan jyrän tiivistysarvon ja vertailulaitteen mittaustulosten välinen korrelaatio lineaarisella regressiolla. Jos korrelaatiokerroin  $r$  on vähintään 0,7, voidaan jyrän tiivistystyön mittaussarvot muuntaa vertailulaitteen mukaisiksi yksiköiksi. Vertailulaitteen mukaiset arvot voidaan laskea regressiosuoran yhtälön avulla.

Ne voidaan siirtää jyrän tietokoneelle ja käyttää sen jälkeen laatuvaatimusten mukaisissa yksiköissä ilmoitettavia mittaustuloksia jyrästyön ohjaamiseen niin kauan kuin tiivistyskohteen materiaali-, rakenne- ja kosteusolosuhteet vastaavat kalibrointiolosuhteita.

Korjauskerroin on voimassa vain alueella, jonka tiivistysolosuhteet (pohjaolosuhteet, alempi kerros, tiivistettävä kerrospaksuus, kerrosmateriaali, kosteus) vastaavat kalibrointialueen olosuhteista. Tällaisella alueella on tarkoitus saada jyrän tiivistyksen-tarkkailulaite näyttämään riittävällä tarkkuudella suoraan vertailulaitteen mittaustavan mukaista kantavuusarvoa, jolloin voidaan tiivistystyön aikana todeta, täyttääkö

tiivistystyön tulos kaikissa kohdissa kantavuusvaatimuksen. Jos kantavuus alittaa vaatimuksen, on arvioitava alituksen syyt ja tehtävä mahdolliset korjaustoimenpiteet.

Jos korrelaatiokerroin ei täytä jyrävalmistajan ohjeiden vaatimuksia, kalibroinnin tulos ei ole riittävän hyvä. Jos kalibrointia ei pystytä suorittamaan riittävällä tarkkuudella, vaihdetaan tiivistystapa kohdan 6.2 mukaiseen menettelyyn, jossa kerros tiivistetään joka kohdassa maksimitiiveyteen. Enemmän tiivistystyötä vaativiin kohtiin voidaan tällöin kohdistaa enemmän tiivistystyötä ja välttää helpommin tiivistyvien kohtien liiallista jyräämistä. Jyrän mittalaitteiden tulosten perustella todetaan, milloin maksimitiiveys on saavutettu ja vältetään maksimitiiveyden saavuttamisen jälkeinen materiaalia rikkova liiallinen jyräys.

### **6.3.6 Tiivistäminen kalibroinnin jälkeen**

Kalibrointimittausten tulokset voidaan siirtää jyrän tietokoneelle ja käyttää sen jälkeen laatuvaatimusten mukaisissa yksiköissä ilmoitettavia mittaustuloksia jyrästyön laadun ohjaamiseen niin kauan kuin tiivistyskohteen materiaali-, rakenne- ja kosteusolosuhteet vastaavat kalibrointiolosuhteita.

## **7 GPS-paikannus ja tiedonsiirto**

Jyrän tiivistyksentarkkailulaitteen mittaustulokset kerätään jyrän tietokoneelle. Jyrän mittaustuloksiin voidaan liittää jyrän GPS-vastaanottimen keräämä jyrän sijaintitieto jatkuvana mittauksena. Mittaus- ja niihin yhdistetty paikkatieto tulokset voidaan siirtää jyrän tietokoneelta joko muistitikun avulla tai esim. radioteitse tai GSM:n avulla langattomasti työmaan tukikohtaan tai laadunvalvonnalle. Tiedonsiirrossa voidaan soveltaa samaa menettelytapaa kuin työmaan rakennuskoneautomaation muissa sovellutuksissa.

## **8 Tiivistystyön sähköinen laatudokumentti**


Rakennuskohteen tiivistystyön sähköinen laatudokumentti kootaan työmaan tiivistystöiden kalibrointi-arvoilla korjattujen jyrämittarin mittaustulosten perusteella kerroksittain. Laatudokumenttiin voidaan liittää mittaustulosten lisäksi jyrien ylityskertamäärät. Sähköisten laatudokumentin tallennusformaatti on kehitteillä toisessa projektissa. Toistaiseksi tulokset voidaan tallentaa ainakin kuvina PDF- muodossa. Parhaiten tuloksia voidaan toistaiseksi käsitellä ilman jyräkohtaisia ohjelmia, esim. EXCEL- taulukkolaskennalla.


- [1] Sitomattomien materiaalien jatkuvatoiminen tiivistystarkkailu, Helsinki 2012. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä, Tiivi-projektin loppuraportti.
- [2] Kontinuerlicher walzenintergrierter Verdichtungsnachweis, RVS 8S.02.6. Itävalta.

## Tiivistyksentarkkailulaitteen kalibrointilomake

### Esimerkki: Hamm

# HCN - Calibration as per EV2





---

**Project**

Project name:

Nummela

Company name:

Skanska / VTT

Date:

26.6.2008

---

**Machine settings**

Type of roller:

3412

Serial number:

967

Amplitude: (small / big)

small

Frequency:

33

hz

Speed:

3

km/h / mph

---

**Soil settings**

Soil conditions:

Layer:

Calibration system:

FWD

---

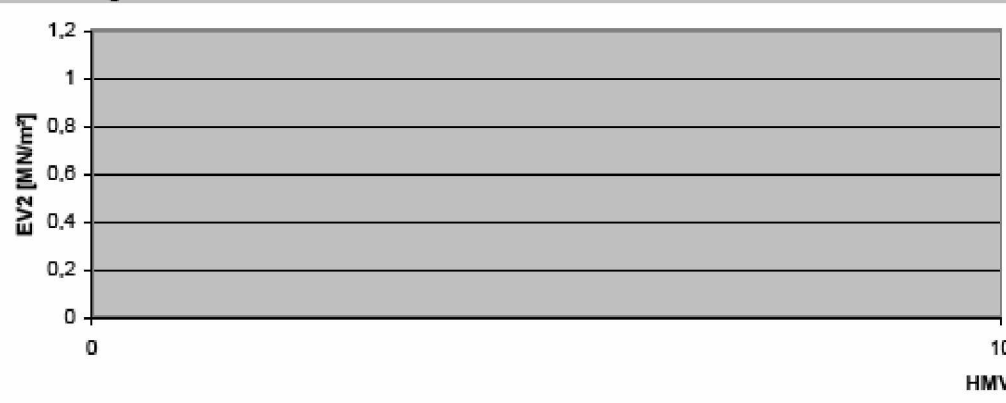
**Data of calibration**

Measuring point	Longitude	Latitude	HVV	EV1	EV2	EV2/EV1
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

\* no dots as separator!

---

**Calibration diagram**



---

**Correlation factor (r) = root of R² must be >0.7 !**

$R^2 =$  #DIV/0!

$r =$  #DIV/0!

---

**Calibration staff:**

Name of job supervisor:

Signature:

Name of tester/test laboratory:

Signature:



Ohje 30.12.2010

*Laadittu Liikenneviraston ohjeen ”Päällysrakenteen stabilointi 2007” liitteen 10 perusteella*

## Koejyräys ilman jyvän tiivistyksentarkkailulaitetta

### 1. Yleistä

Koejyräys rakennustyömaalla tehdään julkaisun InfraRYL:ssä esitettyjen yleisten jyräysohjeiden tarkistamiseksi tiivistyskohteiden olosuhteisiin ja materiaaleihin sopiviksi tai jyrättävän kerroksen maksimitiiviyden määrittämiseksi.

Tämän ohjeen mukainen koejyräys voidaan tehdä ilman jyräkohtaista tiivistyksen-tarkkailulaitetta. Jos tiivistystyötä ohjataan jyrän jatkuvatoimista tiivistyksentarkkailulaitteen avulla, koejyräyksessä on suositeltavaa noudattaa Tiivi-projektin loppuraportin liitteen 1 ohjeita.

Koejyräyksessä käytetään samaa jyräystapaa, materiaalin kosteuspitoisuutta ja kerrospaksuuksia kuin varsinaisessa tiivistystyössä.

Ennen koejyräystä

- määritetään tiivistettävän materiaalin optimikosteus laboratoriossa
- varmistetaan jyrän toimintakunto (amplitudit, taajuudet)
- varmistetaan, että tiivistettävän kerroksen kasteluun on käytettävissä tarvittava kalusto ja
- kalibroidaan tiheyden tai kantavuuden mittauksessa käytettävä vertailulaite.

### 2. Jyräyksen suoritustavan tarkistaminen koejyräyksellä

Jos tiivistettävän materiaalin maksimikuivairtoiheys on määritetty laboratoriossa Proctor-menetelmällä tai kiertotiivistimellä, voidaan koejyräyksellä varmistaa, miten tiiviyssastevaatimukset saavutetaan. Koejyräyksen tarve riippuu mm. kohteen suuruudesta, kantavuudesta, materiaaleista, kerrospaksuuksista ja aikaisemmista kokemuksista. Koejyräyksen perusteella voidaan mm. optimoida tarvittavat ylityskerrat, kerrospaksuudet, jyrävalinnat ja asetukset.

Koejyräys tehdään rakennuskohteelta valittavalla kantavuudeltaan, kerrospaksuudeltaan ja materiaaliltaan tyypillisellä alueella. Materiaalin kosteus ei saa poiketa enempää kuin 2 %-yksikköä laboratoriossa määritetystä optimikosteudesta. Jos alustan kantavuus vaihtelee merkittävästi, koejyräys on tehtävä erikseen huonomman ja paremman kantavuuden alueilla. Vastaavasti esim. erilaisten kerrospaksuuksien, jyrien ja asetusten kokeilu edellyttää useampaa koealuetta.

Koealueen leveyden on oltava vähintään 3 kertaa valssin leveys siten, että voidaan tiivistää kolmea rinnakkaista kaistaa 10 - 20 cm limityksin ja siten, että reunoille jää vielä sivusiirtymät estävä tukipiennar. Koealueen pituuden on oltava yli 20 m ja lisäksi alueen päissä tulee olla vähintään 2 kertaa jyrän pituuden olevat jyrien kääntymis- tai kaistanvaihtoalueet.



Koejyräyksessä ensimmäinen ylityskerta tehdään ilman täryä, neljä seuraavaa ylityskertaa suurella amplitudilla (yleensä 1,2 - 2 mm) ja loput ylityskerrat pienellä amplitudilla (yleensä 0,6 - 1 mm)

Tiheysmittauksia tehdään keskimmäisen tiivistyskaistan keskelle pituussuunnassa 6 eri kohtaan ennen tiivistystä asennetuista teleskooppiputkista säteilymittauslaitteella (radiometrinen tiiviyssmittari) käyttäen suoramittausmenetelmää, joka on kuvattu ohjeen TYLT Yleiset perusteet kohdassa 42.2. Mittaukset tehdään jokaisen jyrän ylityskerran jälkeen ja jyräystä jatketaan kunnes ylityskerran mittaustulosten keskiarvo on kaksi kertaa peräkkäin pienempi kuin aikaisemmin mitattu suurin keskiarvo.

Mitattuja kuivairtoteiheyksiä verrataan laboratoriossa mitattuihin maksimikuivairtoteiheyksiin ja määritetään jyrän ylityskertojen määrä, jolla tiiviysastevaatimukset saavutetaan.

Jos tiivistysastevaatimusta ei saavuteta, selvitetään syy (esim. jyrän ja jyräystavan sopivuus, vertailuteiheyden ja säteilymittauslaitteen kalibroinnin oikeellisuus, alustan kantavuus, materiaalin rakeisuus ja kosteus, ylityskertojen riittävyys) ja harkitaan jatkotoimenpiteet. Kysymykseen voi tulla uusi koejyräys korjaustoimenpiteiden jälkeen tai koejyräyksessä saadun maksimiteiheyden (suurin keskiarvo) ottaminen uudeksi vertailuarvoksi tiiviysasteen laskemisessa.

Jos koejyräyksessä saavutettu tiheys on selvästi suurempi kuin vertailuteiheys, tehdään vastaavat tarkistukset kuin edellä tiiviysastealituksen johdosta. Jos virhettä ei löydy, otetaan koejyräyksessä saavutettu maksimiteiheys uudeksi vertailuarvoksi, jonka perusteella määritetään tiiviysastevaatimukset ja niiden täyttämiseksi tarvittavat jyrän ylityskerrat.

### **3. Maksimikuivairtoteiheyden määrittäminen koejyräyksen avulla**

Jos maksimikuivairtoteiheyttä ei ole voitu määrittää laboratoriossa, se määritetään tekemällä koejyräys vähintään 12 tonnia painavalla täryjyrällä ja noudattaen edellisessä kappaleessa kuvattua menetelyä.

Koejyräysalueen tiivistettävän kerroksen kosteus tulee mitata välittömästi ennen koejyräyksen suorittamista. Materiaalin kosteus ei saa tällöin poiketa enempää kuin 2 %-yksikköä optimikosteudesta.

Työn aikana tiiviyssuhteet lasketaan jakamalla mitatut kuivairtoteiheydet koejyräyksessä määritetyllä maksimiteiheydellä.

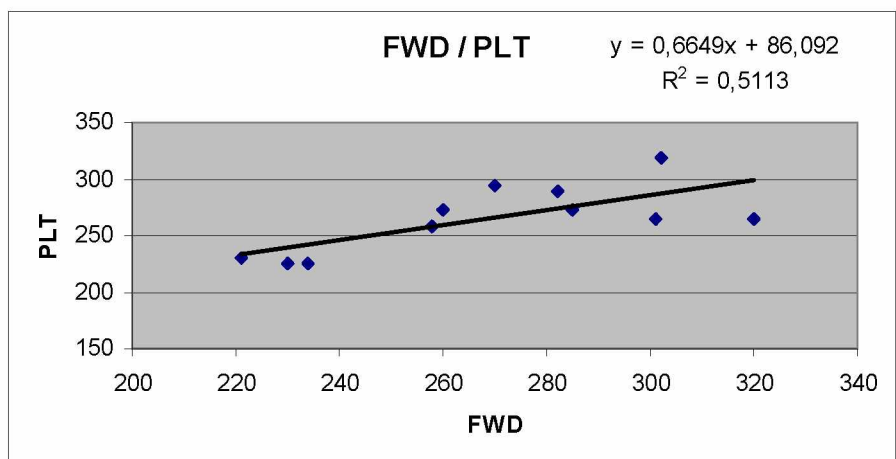
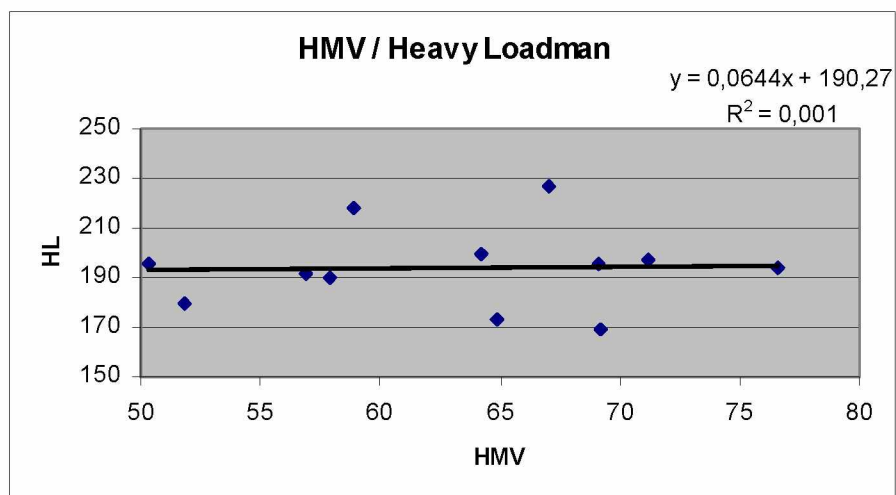
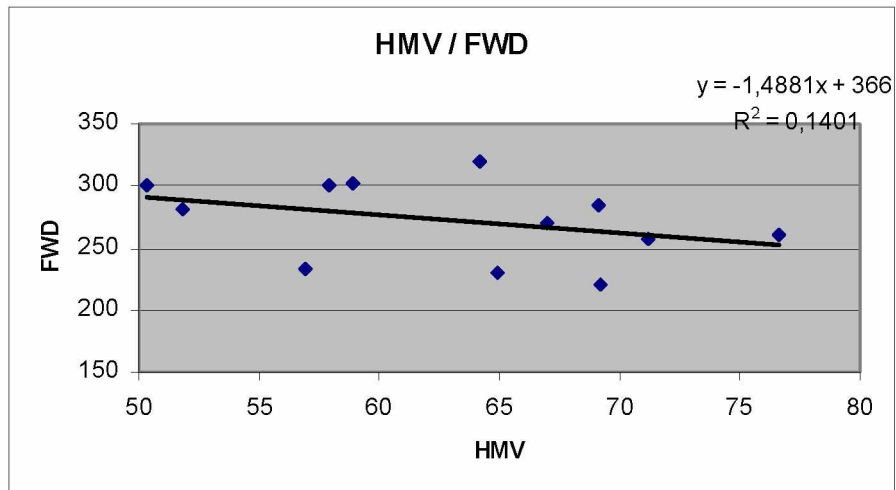
## **4. Raportointi**

Suoritettu koejyräys raportoidaan aina kirjallisesti ja raportointiasiakirja liitetään työmaan laatuasiakirjoihin. Koejyräyksestä raportoidaan ainakin seuraavat tiedot:

- koejyräyksen suoritusajankohdan päivämäärä ja ilman lämpötila
- koejyräysalueen sijainti, pituus ja leveys
- tiivistettävän kerroksen tyyppi, kerrospaksuus, materiaali ja sen kosteus
- jyrätiedot (jyrän merkki, malli ja paino)
- koejyräyksessä käytetty jyrän amplitudi, taajuus, ajonopeus)
- koejyräyksen yhteydessä tehdyt mittaukset ja mittaushohtien sijainnit
- koejyräyksen tulokset ja tehdyt johtopäätökset.

## Kalibrointituloksia

Kohteessa Vt 2, Nummela, Y5 kalibrointia ei voitu suorittaa  
Referenssilaitteet (Dynatest, Raskas Loadman ja levykuormituskoee)





# Jyrien ja niiden varusteiden teknisiä tietoja

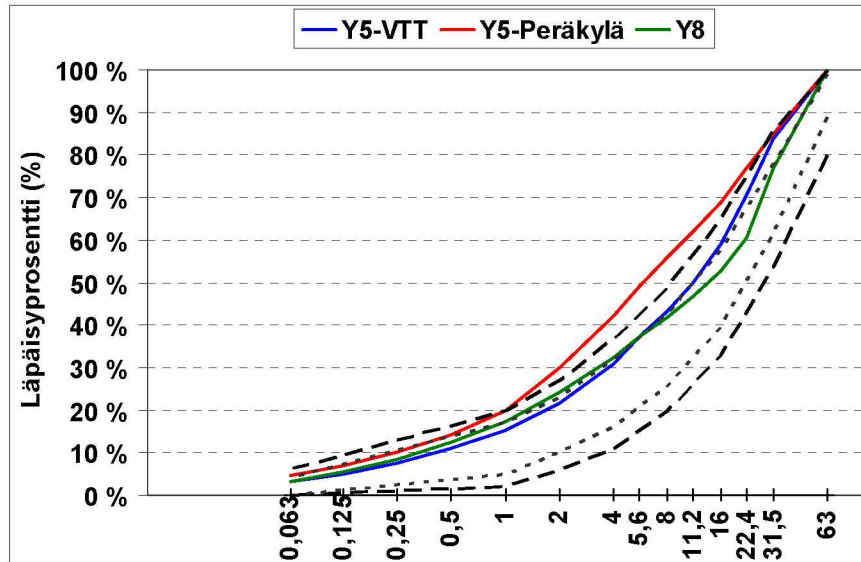
Kohde: Suurpelto, Espoo

		Jyrän maahantuoja ilmoittama tieto		
TÄRYJYRÄ				
Jyrän merkki		Dynapac	Caterpillar	Hamm
Malli		CA302 DCO	CS 56	3413HT
Sarjanumero		68491204	FSC383	H180 1352
Maahantuoja		KH-Koneet Oy	Wihuri Oy Witraktor	Wirtgen Finland Oy
Valmistaja		Dynapac	Caterpillar	Hamm
Valmistusmaa ja valmistusvuosi		Ruotsi 2007	Ranska 2009	Saksa 2009
Jyrän massa	tonnia	13	12,5	12,2
Valssin massa	tonnia	4	6,7	6,7
Viivakuorma (iman täryä)	kg/cm	38	31,9	31,3
Valssin leveys	mm	2130	2130	2140
Valssin frekvenssi (min - max)	Hz	30	31,9	20 - 40
Valssin amplitudi (min - max)	mm	0,1 - 2,0	0,9-1,8	0,90-1,91
TIIVEYDENTARKKAILULAITE				
Tiiveydentarkkailulaitteen merkki		Dynapac	Accu Grade	Hamm
Malli		Dynapac CMP-3		HQC navigator
Sarjanumero				
Maahantuoja		KH-Koneet Oy	Wihuri Oy Witraktor	Wirtgen Finland Oy
Valmistaja		Dynapac	Trimble	Hamm
Valmistusmaa ja valmistusvuosi		Ruotsi 2007	USA 2009	Saksa 2009
Tiiveydentarkkailulaitt. ilmoittama tulos		CMV		Suht. arvo 0-120
GPS-LAITE				
GPS-laitteen merkki		Trimble	Accu Grade	Trimble
Malli		AgGPS 332 (DGPS)	CD 700	AG 114
Sarjanumero		0225112557	0848J008SM	
Maahantuoja		KH-Koneet Oy	Wihuri Oy Witraktor	
Valmistaja		Trimble	Trimble	Trimble
Valmistusmaa ja valmistusvuosi		USA 2008	USA 2008	USA
GPS:n koordinaatisto		WGS 84	WGS 84	WGS 84
GPS-laitteen paikannustarkkuus				
- sivusuunnassa ilman tukiasemaa		parempi kuin 100 cm	100 cm	lisenssillä 30 cm
- sivusuunnassa tukiaseman kanssa		N/A needs upgraded then 5 cm	2,5 cm	seur.versiossa tukiasemamahdollisuus
- korkeussuunnassa ilman tukiasemaa		ks. yllä	100 cm	
- korkeussuunnassa tukiaseman kanssa		ks. yllä	2,5 cm	
Lisätietoja antaa		Kari Kuusisto	Max Björkskog	Ari Tulus
		KH-Koneet Oy	Wihuri Oy Witraktor	Wirtgen Finland Oy



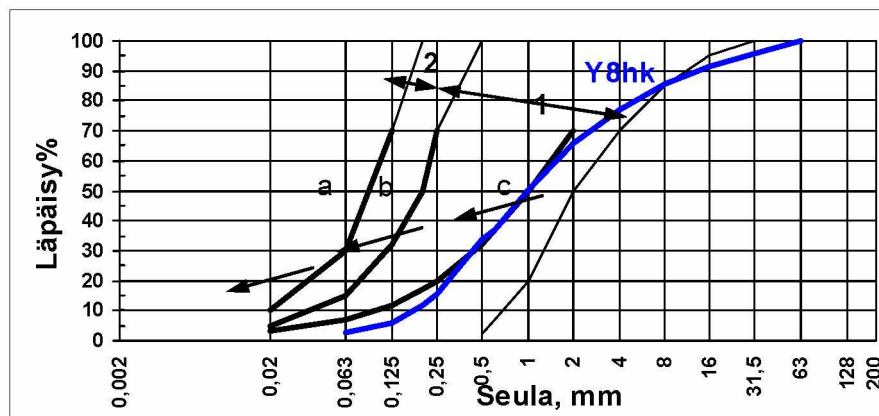
## Koealueiden rakeisuustietoja

Yksityistien Y5 ja Y8 murskeiden # 0/56 mm rakeisuudet, Vihti



### Yksityistien Y8 hiekan rakeisuus, Vihti


Yksityistien Y8:n hiekan tieltä otetun näytteen rakeisuutta on alla olevassa kuvassa verrattu InfraRYL osan 1 kuvassa 21111:K1 esitettyyn suodatinkerroksen hiekan rakeisuuteen.

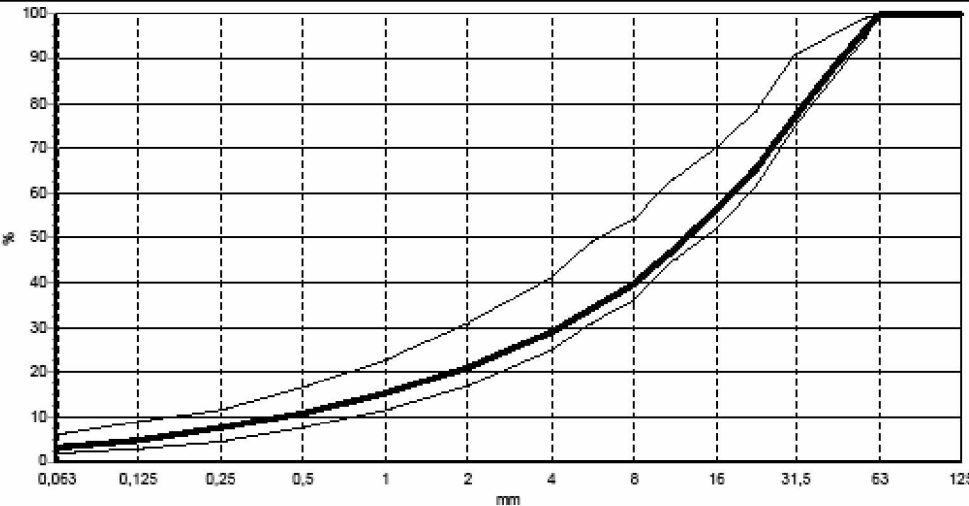


Rakeisuusalueet	Seulakoot ja niiden läpäisyprosentit								
	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	8	31,5
Alue 1	0-5	0-15	0-32	0-70	0-100	20-100	50-100	85-100	100
Alue 2	5-10	15-30	32-70	70-100	100	100			
		2,5	5,7	15,5	33,7	50,2	65,7	85,3	95,5
Paksut viivat <sup>1)</sup>	a	10	30	70					
	b	5	15	32					
	c	3	7	12	20	32	50	70	

Suodatinkerroksen rakeisuuden tulee normaalisti olla alueella 1. Alueen 2 käyttö on sallittu suunnitelmissa osoitetuissa kohdissa. Rakeisuuskäyrä ei saa ylittää paksuja viivoja nuolen suunnassa.


# Kohteen Nummela Y5 murskeen KaM 0/56 mm rakeisuus. Kiviaineksen toimittajan laatu- seloste

<b>LOHJA RUDUS</b>		<b>LAATUSELOSTE</b>				
Lähde: Mäntymäki		Laboratorio nro----			Tulostettu: 17.6.2008 1/2	
Tuote: KaM 0/56		Tarkenne: SIT/ Yleis/ Kantava			Sijainti:	
Kosteus [%]	K.arvo	K.hajonta Min	Max		Muotoarvo [%]	
Liete [%]	1,4	0,6	0,9	2,8	Kumulatiiviarvo [%]	
Humus					Murtop. C <sub>nn</sub> [%]	
H-luku	361	25	312	392	Murtop. C <sub>m</sub> [%]	
Hienoisuus [%]					Murtop. C <sub>tp</sub> [%]	
Liiteysluku [%]	22	3	19	24	Murtop. C <sub>p</sub> [%]	
Seula[mm]	Läpäisy[%]					
	K.arvo	K.hajonta	Min	Max		
0,063	3,2	0,5	2,4	4,1		Lukumäärä: 8
0,125	5	1	4	6		
0,25	8	1	5	9		
0,5	11	2	8	13		
1	15	3	10	18		
2	21	4	14	26		
4	29	5	19	36		
5,6	34	6	24	42		
8	40	5	29	46		
11,2	47	4	39	53		
16	56	4	49	62		
22,4	66	4	60	74		
31,5	77	4	72	86		
45	90	3	86	93		
56	97	1	95	98		
63	100	0	100	100		
90	100	0	100	100		
125	100	0	100	100		

Laborantti:kts. näytteenottoraportti	Näytteenottaja:kts. testausraportti
Allekirjoitus:	Aika ja paikka:

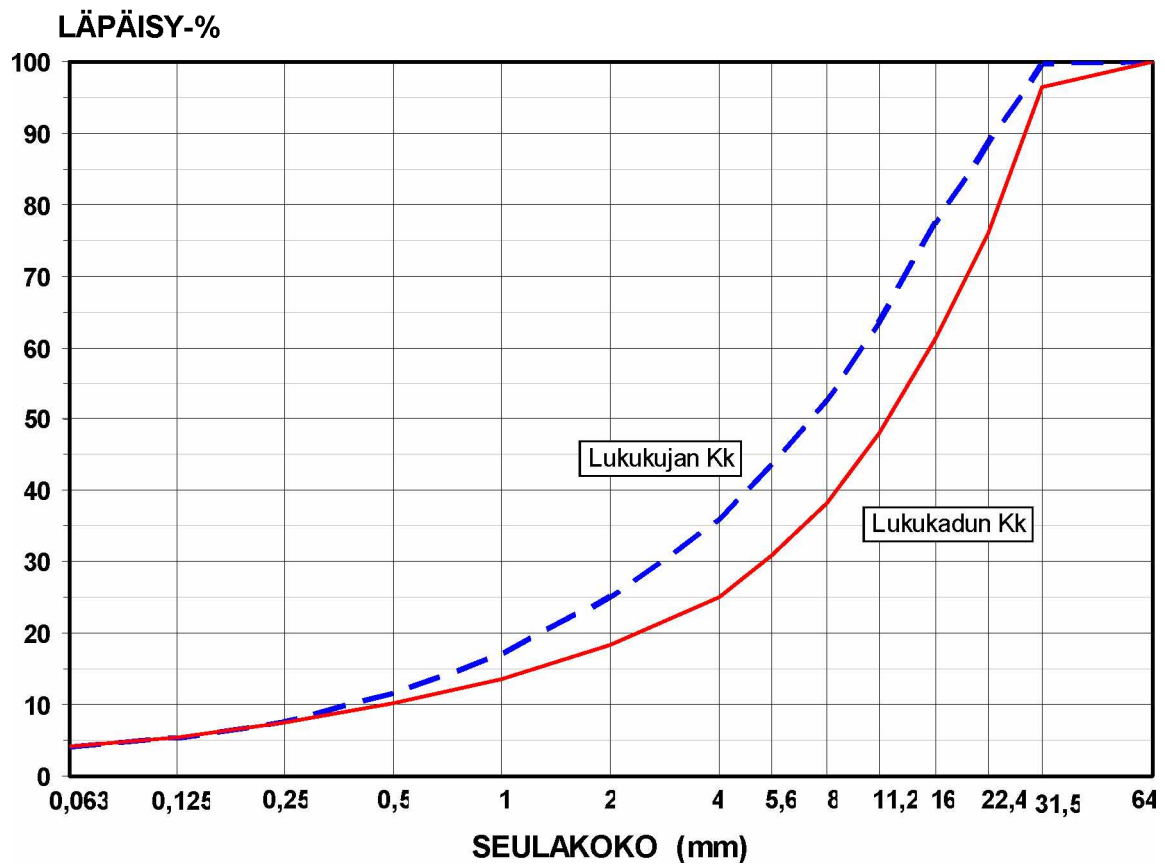
  

LOHJA RUDUS OY AB	
Kiviasies Etelä-Suomi	
seulonta2008.dbf	

# Sitomattoman kantavan kerroksen rakeisuus

Kohde: Lukukatu ja Lukukuja (Suurpelto, Espoo)

Murskenäytteet otettu rakenteesta







# Kantavuusmittaustuloksia - Levykuormituskoe

## Urakan laadunvalvonta

Menetelmä: Levykuormituskoe

Mittaaja: Raimo Peräkylä Oy

Kohde: vt2/ Yksityistiet Y5 ja Y8, sitomaton kantava kerros, Nummela

Pvm	Kohde	Piste n:o	Paalu	Sivuasema	Kerros	E2 MPa	E2/E1	Paks. mm	Lämpö °C
1.7.2008	vt2/ Y5	1	850 KL	vas. 1 m	kantava	222	2,0		
		2	700 KL	oik. 1 m		222	2,0		
		3	800 KL	vas. 1 m		262	2,1		
		4	900 KL	oik. 1 m		226	2,0		
		5	1+000 KL	vas. 1 m		230	2,0		
		6	1+100 KL	oik. 1 m		220	2,3		
		7	1+200 KL	vas. 1 m		260	2,3		
		8	1+300 KL	oik. 1 m		285	2,2		
		9	1+395 KL	oik. 1 m		212	2,4		
		10	1+410 KL	0 m		220	2,2		
		11	1+430 KL	vas. 1 m		242	2,3		
		12	1+8xx KL	vas. 1 m		251	2,2		
		13	1+8xx KL	vas. 1 m		222	2,2		
		14	1+8xx KL	vas. 1 m		220	2,7		
		<b>ka</b>				<b>235</b>	<b>2,2</b>		
15.7.2008	vt2/ Y8	1	40 KL	vas. 1 m	kantava	126	3,2		
		2	140 KL	oik. 1 m		112	2,5		
		3	240 KL	vas. 1 m		174	2,2		
		4	340 KL	oik. 1 m		112	1,8		
		5	450 KL	0 m		143	1,8		
		<b>ka</b>				<b>133</b>	<b>2,3</b>		
2.9.2008	vt 2/ Y5	1	2+240	oik.	kantava	127	1,8		
		2	2+140	vas.		230	2,1		
		3	2+000	vas.		174	2,5		
		<b>ka</b>				<b>177</b>	<b>2,1</b>		
9.9.2008	vt 2/ Y5	1	1+900	oik. kaista	päällyste	145	1,7	40	15
		2	1+800	vas. Kaista		243	1,8		
		3	1+700	oik. kaista		304	1,8		
		4	500	vas. Kaista		357	1,7		
		5	400	oik. kaista		337	1,8		
		6	300	vas. Kaista		319	2,0		
		7	200	oik. kaista		378	1,8		
		<b>ka</b>				<b>298</b>	<b>1,8</b>		

# Kantavuusmittaustuloksia - Levykuormituskoe

Mittaja: HKR

Kohde: Vuosaaren satama, varastokenttä



HELSINGIN KAUPUNKI/RAKENNUSVIRASTO  
YMP/KATULABORATORIO

RAPORTTI

19.8.2008

## KANTAVUUSMITTAUSRAPORTTI

Kohde..... 80 Vuosaari  
Tarkka sijainti..... Varastokenttä  
Tutkimus pvm. ja aika..... 19.08.2008 12:00  
Käyntikerta..... 1  
Aluetsto/työmaa..... VTT/Kyösti Laukkanen  
Urakka.....  
Urakoitsija..... NCC Roads Oy  
Katuluokka..... 3  
Kantavuusluokka..... C  
Kerrostyyppi..... Kantava  
Päällysrak. kok. paks..... 0  
Päällysteen lämpötila..... 0  
Säätöla..... + 14 vesisade  
Mittaja..... Laurila Simo

Kommentit :

## Mittaustulokset

Piste/ paalu	Kaista	Et.reunasta	E1 MN/m <sup>2</sup>	E2 MN/m <sup>2</sup>	E2/E1	Pienin sal. E2	Suurin sal. E2/E1
1	0	0	85	191	2.2		
2	0	0	73	167	2.3		
3	0	0	90	185	2.1		
4	0	0	92	180	2.0		
5	0	0	89	193	2.2		
6	0	0	74	167	2.3		
7	0	0	83	178	2.1		
8	0	0	60	150	2.5		
9	0	0	77	162	2.1		
10	0	0	79	163	2.1		
11	0	0	89	185	2.1		
12	0	0	65	165	2.5		
Keskiarvo:			80	174	2.2		

Hyväksynyt... : \_\_\_\_\_

# Kantavuusmittaustuloksia

## Pudotuspainolaite - Heavy loadman

Urakan laadunvalvonta

Mittaaja: Maatekniikka Oy

Useita kadunrakennuskohteita, Suurpelto, Espoo

Pvm	Piste n:o	Kohde	Sivu- asema	Kerros	E1 MPa	E2 MPa	E2/E1	Lämpö °C
20.10.2009	1	Lukukatu	ajoura	Kantava	111	182	1,64	6
	2				157	188	1,20	
	4				128	173	1,35	
	5				111	157	1,41	
	6				171	223	1,30	
	7				95	154	1,62	
	8				152	236	1,55	
	9				140	201	1,44	
	10				131	225	1,72	
	11				120	165	1,38	
	<b>ka</b>				<b>132</b>	<b>190</b>	<b>1,46</b>	
28.10.2009	2	Lukukuja	ajoura	jakava	103	166	1,61	3
	3				81	115	1,42	
	4				59	64	1,08	
	5				59	67	1,14	
	6				86	121	1,41	
	7				95	112	1,18	
	8				89	149	1,67	
	9				89	142	1,60	
	10				67	101	1,51	
	11				56	114	2,04	
	<b>ka</b>				<b>78</b>	<b>115</b>	<b>1,47</b>	
28.10.2009	1	Henttaan- kaari	ajoura	Kantava	95	138	1,45	3
	2				105	164	1,56	
	3				93	145	1,56	
	4				104	147	1,41	
	5				83	125	1,51	
	6				101	133	1,32	
	7				77	123	1,60	
	8				73	136	1,86	
	9				73	126	1,73	
	10				65	112	1,72	
	<b>ka</b>				<b>87</b>	<b>135</b>	<b>1,57</b>	
28.10.2009	1	Henttaan- kaari	kalibr. pisteet	Kantava	65	106	1,63	3
	2				86	129	1,50	
	3				92	144	1,57	
	4				112	150	1,34	
	5				72	136	1,89	
	6				94	126	1,34	
	7				72	110	1,53	
	8				73	108	1,48	
	9				97	150	1,55	
	10				71	111	1,56	
	<b>ka</b>				<b>83</b>	<b>127</b>	<b>1,54</b>	



# Kantavuusmittaustuloksia

## Pudotuspainolaite - Kevyt Loadman

Kohde: Vt 2/Nummela, yksityistie Y5, Mittaaja: Peräkylä Oy

Kuormituslevy D 300 mm, Menetelmä: PANK 9001

Mittaustulosten yksikkö: MPa

Mittauspiste	E1	E2	E3	E4	E5	E6
21 a	111				169	
b	122	179	179	175		
22 a	122				164	
23 a	135				156	
24 a	119				167	
b	122	164	164	172	172	
25 a	109				185	
b	116	156	175	172		
26 a	132				256	
27 a	132	156	164	167		
28 a	103	141	149	156	167	159
29 a	161	179	179			
30 a	147	159	159	161		
b	147	196	179	156	161	154
31 a	147	161	167	175	172	
b	127	147	179	189	164	159
32 a	154	169	172	172		
b	133	167	184	200	169	
PL 1430 a	105	141	143	147	149	

**Kevyellä Loadman-pudotuspainolaitteella** mitattiin levykuormituskokeen jälkeen niin, että a mittauksissa pohjalevyllä hierottiin mitattavan kohteen pinta tasaiseksi jonka jälkeen mittaus suoritettiin.

b mittaukset otettiin tarkalleen samoista paikoista kuin a mittaukset, mutta pohjalevyn ja kerroksen välissä käytettiin tasaushiekkaa joka samoin kuin a mittauksissa hierottiin tasaiseksi.

Pudotuspainolaite "tärähti" mittauspisteissä 28a E1 ja 30b E4, jolloin ilmoitettu tulos voi olla virheellinen.

Levykuormituskokeen pisteessä no 22 vastapainon liikahtaminen nosti kuormituksen hetkellisesti reilusti yli suurimman testissä käytettävän kuormituksen, joten kyseisen pisteen mittaamisen on jätetty kesken virheellisen tuloksen takia.



# Tiheys- ja kosteusmittaustuloksia

Radiometrinen menetelmä

Laite: Troxler 3411-B

**Kohde: Vt2, Nummela, Y5**

Nummela 27.6.08 & 8.7.08							
Troxler-mittaus syvyys 200mm							
	27.6.2008	8.7.2008					
DS	1805	1813					
MS	555	560					
PVM	PISTE	DC	MC	WD	DD	M	%M
20080627	PL1410vas	655	51	2238	2180	58	2,7
20080627	PL1410vas	685	49	2207	2153	54	2,5
20080627	PL1410vas	691	51	2201	2143	58	2,7
20080627	22	687	47	2206	2154	51	2,4
20080627	22	725	46	2169	2120	49	2,3
20080627	22	736	44	2159	2113	46	2,2
20080627	25	656	52	2237	2177	60	2,7
20080627	25	673	49	2220	2165	54	2,5
20080627	28	673	48	2220	2167	53	2,4
20080627	28	675	48	2218	2165	53	2,4
20080627	28	683	46	2210	2160	49	2,3
20080627	30	678	44	2215	2169	46	2,1
20080627	30	754	45	2143	2095	48	2,3
20080627	30	805	44	2099	2053	46	2,2
20080708	PL1410vas	740	36	2159	2127	32	1,5
20080708	PL1410vas	687	32	2210	2184	25	1,2
20080708	PL1410vas	737	34	2162	2133	29	1,3
20080708	22	771	32	2132	2107	25	1,2
20080708	22	763	36	2139	2107	32	1,5
20080708	22	742	33	2158	2131	27	1,3
20080708	25	673	34	2224	2195	29	1,3
20080708	25	724	32	2174	2149	25	1,2
20080708	25	743	31	2157	2133	24	1,1
20080708	28	770	32	2133	2107	25	1,2
20080708	28	804	37	2104	2070	34	1,6
20080708	28	862	37	2058	2024	34	1,7
20080708	30	762	34	2140	2111	29	1,4
20080708	30	780	34	2124	2095	29	1,4
20080708	30	798	34	2109	2080	29	1,4



# Tiheys- ja kosteusmittaustuloksia

Radiometrinen menetelmä

Laite: Troxler 3411-B

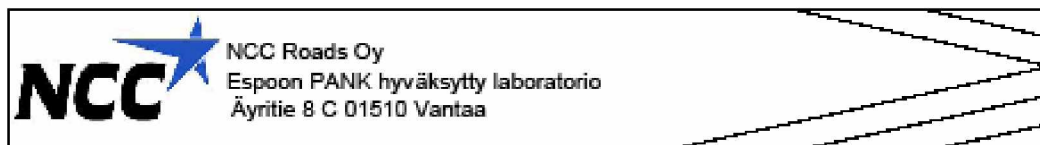
**Kohde: Vt2, Nummela, Y5**

Nummela Y8 14&15.7.08							
				14.7. Hiekan päältä			
Troxler-mittaus syvyys 200mm				15.7. Kantavan päältä			
	14.7.2008	15.7.2008					
DS	1801	1799					
MS	557	566					
PVM	PISTE	DC	MC	WD	DD	M	%M
20080714	pl68.2 / 1.9 oik	941	50	1995	1939	56	2,9
20080714	pl68.2 / 1.9 oik	1123	52	1882	1822	59	3,2
20080714	pl68.2 / 1.9 oik	882	52	2037	1978	59	3
20080714	pl80 / 2.1 oik	1082	42	1906	1864	42	2,3
20080714	pl80 / 2.1 oik	1141	45	1872	1825	47	2,6
20080714	pl80 / 2.1 oik	1089	44	1902	1856	46	2,5
20080714	pl80 / 2.1 oik /pinta	707	43	1862	1818	44	2,4
20080714	pl100 / 2 oik	841	60	2067	1995	73	3,6
20080714	pl100 / 2 oik	910	62	2016	1940	76	3,9
20080714	pl100 / 2 oik	821	59	2083	2012	71	3,5
20080714	pl86.5 / 2.15 oik	772	56	2125	2059	66	3,2
20080714	pl86.5 / 2.15 oik	853	54	2059	1996	63	3,1
20080714	pl86.5 / 2.15 oik	804	58	2097	2028	69	3,4
20080714	pl86.5 / 2.15 oik /pinta	643	60	1960	1887	73	3,8
20080715	45 / 1.0 vas	528	60	2387	2316	71	3,1
20080715	45 / 1.0 vas	645	53	2246	2187	60	2,7
20080715	45	631	58	2261	2193	68	3,1
20080715	45	598	54	2299	2238	61	2,7
20080715	45	687	53	2203	2143	60	2,8
20080715	45 / tasaushiekka	666	58	2224	2156	68	3,1
20080715	42	756	50	2138	2084	55	2,6
20080715	42	676	51	2214	2158	56	2,6
20080715	42	708	54	2182	2121	61	2,9
20080715	48	665	57	2225	2159	66	3,1
20080715	48	689	50	2201	2147	55	2,5
20080715	48	671	57	2219	2152	66	3,1

# Kalibrointipisteiden Troxler- ja Proctor-tulokset

## Vuosaaren sataman varastokenttä

Jyrä Hamm



### TROXLER MITTAUS - YLEISET TIEDOT

Raportti nro	VuoSa troxler TIIVI	Kohde	Varastoalue
Asiakas	NCC Roads Oy	Raporttipäivä	19.8.08
Urakka	VuoSa PÄÄLL2	Laborantti	Janne Kovanen

### TROXLER MITTAUS - TUTKIMUSTULOKSET

mittapiste				koordinaatit HKR		kulvatiheys	märkätiheys	tiliheys	kosteus
pvm	sarja	nro	materiaali	x	y	(kg/m³)	(kg/m³)	(%)	(%)
19.8.08	TIIVI	1	KaM 0/32			2 193	2 262	98,8	4,1
		2	KaM 0/32			2 194	2 269	98,9	4,3
		3	KaM 0/32			2 210	2 306	99,6	4,3
		4	KaM 0/32			2 204	2 263	99,3	3,6
		5	KaM 0/32			2 210	2 312	99,6	4,6
		6	KaM 0/32			2 020	2 122	91,0	5,0
		7	KaM 0/32			2 001	2 092	90,2	4,5
		8	KaM 0/32			2 122	2 221	95,6	4,7
		9	KaM 0/32			2 150	2 244	96,9	4,4
		10	KaM 0/32			2 050	2 141	92,4	4,4
		11	KaM 0/32			2 121	2 221	95,6	4,7
		12	KaM 0/32			2 087	2 197	94,1	5,3

keskiarvo	2 130	2 226	96,0	4,5
keskihajonta	76,2	74,7	3,4	0,4
proctor koe KaM 0/22	2 324	2 445	100,0	5,2
proctor koe KaM 0/32	2 219	2 293	100,0	3,3

Tutkimus koskee vain mitattuja pisteitä

Pisteiden koordinaatit, Mittaustekniikka Oy

Kalibrointipisteiden koordinaatit mitattiin takymetrillä Mittaustekniikka Oy

TIIVI TUTKIMUS, VUOSA - SIJAINTITIEDOT								
mittapiste			koordinaatit HKR		koordinaatit KKK2		koordinaatit WGS84	
pvm	sarja	nro	x	y	x	y	P	I
19.8.08	TIIVI	1	24002,42	62852,39	6679288,52	2565652,00	60.2198062	25.1812556
		2	23982,90	62853,33	6679269,02	2565653,21	60.2196356	25.1812675
		3	23980,10	62853,41	6679266,22	2565653,33	60.2196087	25.1812666
		4	23962,24	62852,28	6679248,34	2565652,45	60.2194473	25.1812427
		5	23941,31	62854,10	6679227,44	2565654,56	60.2192586	25.1812720
		6	23934,51	62854,74	6679220,65	2565655,29	60.2191956	25.1812878
		7	23927,19	62854,99	6679213,33	2565655,64	60.2191328	25.1812855
		8	23913,39	62860,11	6679199,60	2565660,96	60.2190063	25.1813712
		9	23918,93	62860,68	6679205,16	2565661,45	60.2190600	25.1813912
		10	23924,50	62860,45	6679210,72	2565661,14	60.2191049	25.1813928
		11	23947,29	62859,08	6679233,49	2565659,45	60.2193116	25.1813641
		12	23960,96	62858,74	6679247,15	2565658,92	60.2194374	25.1813506

#### HUOMI

WGS 84 koordinaatit on ilmoitettu asteina ja astedesimaaleina (aa.saaaaa)





